

05.05.03

К 727 ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

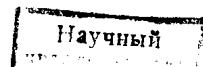


КОСТЮЧЕНКО ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРАКТОРОВ

Специальность 05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



ЧЕЛЯБИНСК - 2000

Работа выполнена в ГСКБ ОАО "Челябинский тракторный завод" и на кафедре "Автомобили и тракторы" Южно-Уральского государственного университета

Научный руководитель: кандидат технических наук, заслуженный изобретатель России, профессор **Пинигин Б.Н.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Кычев В.Н.,**

кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник **Карлов А.Г.**

Ведущее предприятие: **УралНИИС НАТИ**

Защита состоится "5" июля 2000 г. в 16 ч. на заседании диссертационного совета К053.13.02 Южно-Уральского государственного университета по адресу: 454080, г.Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.  
Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу на имя ученого секретаря.

Автореферат разослан "3" июля 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

**Жестков В.В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Работа промышленного трактора в агрегате с бульдозером, являющимся основным видом рабочего оборудования, характеризуется рядом особенностей: выраженной цикличностью технологических процессов; наличием в рабочем элементе цикла стадии копания с резанием и накоплением грунта перед рабочим органом и стадии транспортирования; значительными усилиями, действующими на бульдозерный агрегат (БА) в вертикальной плоскости и изменяющими его сцепной вес по определенным закономерностям; высокими амплитудами горизонтального сопротивления и вертикального усилия, связанными с необходимостью при управлении рабочим органом периодически перераспределять вес БА на грунт через рабочий орган и обратно; высоким отбором мощности двигателя на манипуляции рабочим органом; разнообразием разрабатываемых грунтов и др.

Учет данных особенностей является необходимым условием при формировании критериальных моделей и методов, по которым оценивается эффективность машины и на основе которых оптимизируются показатели тяговой характеристики и базовые показатели трактора и БА.

Однако, в настоящее время ряд определяющих особенностей работы промышленного трактора, в частности наличие и закономерности действия вертикальных усилий, вследствие их недостаточной изученности, не учитываются в теоретических критериальных моделях производительности и мощностного потенциала производительности (МПП), применяемых на стадии проектирования промышленных тракторов. Это приводит к ошибкам в методологии (априорной трактовке нагруженности БА на рабочем элементе цикла, как стационарного случайного процесса, отсутствию учета различий "динамических" тяговых характеристик БА на стадиях копания и транспортирования, заниженным усредненным оценкам потребной мощности, затрачиваемой на манипуляции рабочим органом, и др.), при этом применяемые критерии эффективности, их модели и методы оценки, а, следовательно, оптимизируемые показатели оказываются непригодными.

Помимо необходимости создания адекватных критериальных моделей и методов теоретической оценки эффективности промышленных тракторов, позволяющих оптимизировать их показатели на стадии проектирования, существующая практика испытаний требует разработки критерии и методов для быстрой и достоверной экспериментальной оценки эффективности созданных натурных образцов. Применяемые методы испытаний на сравнительную техническую производительность, при которых оцениваются средние выходные показатели созданного образца и аналога (призма грунта, скорость, время технологической операции), несмотря на значительные земельные затраты (около 1Га на оба трактора), зачастую приводят к трудностям в интерпретации результатов испытаний, особенно при множестве конструктивных различий образца и аналога. Методы лабораторно-полигонных испытаний более низкого уровня по ГОСТ 23734, 27247, 18509 и др., по которым оценивается эффективность отдельных систем промышленного трактора (тяговые испытания, тормозные испытания двигателя, Накруточка, Испытания)

гидросистемы), при высокой трудоемкости не учитывают особенности его работы и идентичны методам испытаний сельскохозяйственных тракторов.

Целью работы является разработка критериальных моделей и методов, предназначенных для теоретической и экспериментальной оценки эффективности промышленного трактора, на основе учета главных особенностей его работы в составе БА.

Объекты исследования: промышленные тракторы и БА на их базе.

Научная новизна:

- разработаны метод оценки показателей "динамических" тяговых характеристик и уточненные математические модели функционирования БА на стадиях копания и транспортирования на грунтах различной плотности с учетом закономерностей действия вертикальных усилий и других особенностей работы. Разработаны универсальные правила расчета показателей "динамических" тяговых характеристик БА при различном сцепном весе через показатели "статической" тяговой характеристики (оценивается при стандартных тяговых расчетах), позволяющие установить соотношения между тяговыми характеристиками на стадии копания и транспортирования для оптимизации рабочего процесса БА в целом;

- разработан метод теоретической оценки максимальной производительности на основе поиска оптимальных рабочих процессов с учетом различия "динамических" тяговых характеристик на стадиях копания и транспортирования. Уточнены основные положения теории оптимальных рабочих процессов промышленных тракторов, теоретически и экспериментально обоснована оптимальность нестационарных процессов копания. Установлены показатели тяговой характеристики БА и базового трактора, обеспечивающие оптимальные рабочие процессы;

- обоснованы условия разработки энергетического критерия эффективности промышленного трактора, соответствующего критерию производительности;

- разработан критерий для экспериментальных исследований и испытаний промышленных тракторов, соответствующий критерию производительности. Разработаны методы экспериментальной оценки эффективности промышленных тракторов ( модели и методы тягово-динамических испытаний, методические основы стендовых ускоренных лабораторно-полигонных испытаний);

- БА экспериментально изучен как объект с переменным управляемым сцепным весом. Проведена оценка нестационарности рабочих процессов БА и раздельный анализ его нагруженности на стадиях копания и транспортирования. Изучены закономерности вертикальных усилий, действующих на БА на стадиях копания и транспортирования. Установлены эмпирические закономерности горизонтальной и вертикальной составляющих сопротивлению копанию и изучена динамика тягового сопротивления при действии различных напорных давлений на режущей кромке ножа бульдозера. Установлены величины напорных давлений, потребные для эффективной разработки грунтов различной плотности. Уточнены параметры нагрузления БА, связанные с

системой управления рабочим органом (вариации тягового сопротивления и вертикального усилия, отбор мощности двигателя на манипуляции) и оценено их влияние на выбор оптимальных показателей тяговой характеристики и базовых показателей трактора и БА.

Практическая ценность. Разработанные критериальные модели и методы оценки эффективности промышленных тракторов позволяют на стадии проектирования и при испытаниях созданных образцов найти оптимальные показатели тяговой характеристики и базовые показатели, обеспечивающие БА на базе трактора максимальную производительность.

Результаты работы рекомендуются к использованию на заводах отрасли, в проектных, научно-исследовательских и учебных институтах, испытательных и сертификационных центрах.

Практические результаты по выбору оптимальных показателей БА и базового трактора (оптимальные диапазоны тяговых усилий и коэффициент приспособляемости - для тракторов с автоматической МТУ, оптимальные тяговые усилия - для тракторов с механической ступенчатой трансмиссией, потребные величины отбора мощности двигателя на манипуляции рабочим органом, потребные напорные давления на режущей кромке ножа бульдозера) рекомендуются к внедрению на серийно выпускаемых и перспективных моделях промышленных тракторов и промышленных модификациях сельскохозяйственных тракторов.

Внедрение результатов. Результаты внедрены в ОАО "ЧТЗ" на опытной модели БА Б-170М.03-51В с двигателем постоянной мощности и оптимизированными показателями тяговой характеристики, показавшей прирост производительности по сравнению с серийными аналогами на 10...27%.

Рекомендации по оптимальным показателям трактора и БА приняты ОАО "ЧТЗ" для внедрения на перспективных моделях промышленных тракторов класса 10, 15 и БА на их базе, а методы и установка для тягово-динамических испытаний - для использования в практике лабораторно-полигонных испытаний.

Разработанный на уровне рабочего и строительного проекта стенд для ускоренных лабораторно-полигонных испытаний включен в состав сооружений, предназначенных для строительства на полигоне ОАО "ЧТЗ" в п.Мисяш.

Апробация работы. Основные положения работы обсуждены и одобрены на научно-технических конференциях НАТИ (г.Москва, 1989г.), ЧФ НАТИ-ЧПИ (г.Челябинск, 1989 и 1990г.г.), КПИ (г.Кутаиси, 1990г.), ЧФ НАТИ (Челябинск, 1991), ЧПИ (г.Челябинск,1995г.), ИМ УО РАН (г.Екатеринбург, 1996г.), университетских конференциях ЧПИ-ЧГТУ-ЮУрГУ (г.Челябинск, 1991...2000г.г.), ЧГАУ (г.Челябинск, 1999г.), НТС ГСКБ ОАО"ЧТЗ" (г.Челябинск, 1999г.), НМС УМО Госкомобразования (г.Челябинск, 1997г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, получено 3 А.С.ССР и 1 ПРФ.

Объем работы. Диссертация содержит 296 стр. машинописного текста, включает 72 иллюстрации и 19 таблиц. Работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов и практических рекомендаций, списка литературы (168 наим.) и приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы, ее научная и практическая значимость, обоснована цель исследований, отражены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор и анализ теоретических и экспериментальных исследований, посвященных особенностям работы трактора в составе БА - рассмотрены особенности агрегатирования, технологии работы и тяговой динамики; проведен анализ критериев и критериальных моделей, по которым оценивается эффективность промышленных тракторов (производительность, энергетические критерии); рассмотрены существующие методы, примеры из практики и направления развития лабораторно-полигонных испытаний промышленных тракторов; сформулированы задачи и разработана структурная схема исследования.

Изучению специфики работы и разработке связанных с ней вопросов теории промышленного трактора посвящены работы В.И.Баловнева, В.И.Барышева, А.И.Бруссенцева, Ю.В.Гинзбурга, В.Л.Довжика, В.В.Кавунова, И.С.Кавьярова, А.Г.Карлова, Р.К.Кудайбергенова, В.Н.Кычева, Б.Л. Магарилло, Б.Н.Пинигина, Б.М.Позина, Д.И. Федорова, А.М.Холодова и др. Смежные вопросы теории резания грунтов землеройными машинами разработаны К.А.Артемьевым, В.И.Баловневым, Ю.А.Ветровым, Н.Г.Домбровским, А.Н.Зелениным, Д.И.Федоровым и др. В результате проведенного анализа существующих источников установлено следующее.

Наименее изученными остаются особенности тяговой динамики, определяющие не только изменение выходных показателей БА, но и конечную оптимизацию его рабочих процессов, а именно: закономерности и различный механизм действия вертикальных усилий на стадиях копания и транспортирования; различие нагружения БА на данных стадиях тяговыми сопротивлениями и дополнительными факторами, связанными с системой управления рабочим органом, что требует рассмотрения нагружения на рабочем ходе как нестационарного процесса. Раздельное (на стадиях копания и транспортирования) изучение нагружения БА вертикальными усилиями и горизонтальными сопротивлениями является ключевым звеном для разработки методов оценки "динамических" тяговых характеристик БА на данных стадиях, формирования адекватных критериальных моделей, оптимизации рабочих процессов и параметров тяговой характеристики БА и базового трактора.

Существующие теоретические модели производительности либо не позволяют оптимизировать показатели тяговой характеристики (включают их фиксированные значения), либо при отсутствии учета вертикальных усилий приводят к неверным стационарным оценкам оптимальных рабочих процессов БА, и, как следствие, оптимальных показателей тяговых характеристик БА и трактора.

МПП(среднецикловая "полезная" мощность агрегата), включенный в нормативную документацию (ГОСТ 4.373,РД23.82.2-86 и др.) и считающийся аналогом производительности, для БА производительности не эквивалентен и дает различную с ней оптимизацию показателей тяговой характеристики. Основным методологическим недостатком МПП является априорное пред-

ставление тягового сопротивления на рабочем ходе, как стационарной случайной функции или процесса (расчетное математическое ожидание тягового усилия не совпадает с величиной усилия, оптимального по МПП, некорректная оценка типовой усредненной реализации при различных по продолжительности стадиях копания и транспортирования).

Рассмотренные примеры из практики лабораторно-полигонных испытаний тракторов классов 10, 15, 25, 35 показывают, что при существующих высоко трудоемких и затратных методах испытаний на техническую производительность, тяговых и других видах испытаний объективно затруднена оценка влияния на производительность отдельных систем базового трактора.

В этой связи сформулированы задачи исследования.

**Теоретические и методические задачи:**

- по результатам экспериментальных исследований рабочих процессов БА и анализа существующих источников разработать методы расчета "динамических" тяговых характеристик и уточненные модели функционирования БА на стадиях копания и транспортирования с учетом закономерностей действия вертикальных усилий на данных стадиях;

- на этой базе разработать метод оценки максимальной производительности БА путем поиска оптимальных рабочих процессов. Оценить свойства таких процессов и провести соответствующую оптимизацию показателей тяговой характеристики БА и базового трактора для грунтов различной плотности;

- оценить влияние системы управления на выбор оптимальных показателей тяговой характеристики (вариаций тягового сопротивления и вертикального усилия, манипуляций рабочим органом);

- обосновать возможность создания энергетического критерия эффективности промышленного трактора, соответствующего критерию производительности и позволяющего оптимизировать параметры базового трактора на уровне теоретических исследований;

- разработать критерий для экспериментальных исследований и испытаний промышленного трактора, соответствующий критерию производительности и позволяющий достоверно оценивать эффективность БА и базового трактора;

- разработать методы и оборудование для экспериментальной оценки эффективности промышленных тракторов, учитывающие основные особенности его работы и позволяющие проводить комплексные исследования эффективности как промышленного трактора в целом, так и его отдельных систем;

**Экспериментальные задачи:**

- изучить рабочие процессы БА на грунтах различной плотности с корректной оценкой вида процессов (тестированием тяговых сопротивлений и вертикальных усилий, действующих на БА, на стационарность), провести анализ нагруженности агрегата на стадиях копания и транспортирования;

- изучить закономерности вертикального усилия, действующего на агрегат в процессе копания и транспортирования на грунтах различной плотности;

- изучить параметры нагружения БА, связанные с системой управления рабочим органом (вариации тяговых сопротивлений и вертикальных усилий, процессы манипуляций рабочим органом). Уточнить величины потребного отбора мощности, затрачиваемого на манипуляции;

- провести экспериментальную проверку адекватности теоретических положений работы путем испытаний образца трактора с показателями тяговой характеристики, обоснованными в теоретической части работы.

Во второй главе обоснованы критериальные модели для теоретической и экспериментальной оценки эффективности, учитывающие основные основные особенности работы промышленного трактора, разработаны теоретические основы для их формирования. Структура теоретических исследований включала три основных блока.

В первом блоке разработан метод теоретической оценки максимальной производительности БА путем поиска оптимального рабочего рабочего процесса, обоснование показателей тяговой характеристики БА и базового трактора, обеспечивающие такие процессы на грунтах различной плотности. Основами для формирования метода являются разработанный метод расчета показателей "динамических" тяговых характеристик и уточненные модели функционирования БА на стадиях копания и транспортирования.

Во всех рассматриваемых ниже тяговых характеристиках, моделях и расчетах величины тягового усилия (сопротивления)  $\Phi_{kr}$ , касательного усилия на ведущих колесах  $\Phi_k$ , вертикального усилия  $\Phi_v$ , тяговой мощности  $\eta$ , мощностей на ведущих колесах  $\eta_k$ , на буксование  $\eta_b$ , на передвижение  $\eta_f$ , призмы грунта  $q$ , площади вырезаемой стружки  $F$ , отнесены к полному весу  $G_a$  БА, т.е. представлены в удельном виде.

#### Потенциальная тяговая характеристика БА на стадии копания

Из теоретических исследований процесса копания (К.А.Артемьев, В.И.Баловнев, Ю.А.Ветров, Б.М.Позин), при пренебрежении силами инерции известно выражение для тягового сопротивления  $\Phi_e$ :

$$\Phi_e = \Phi_{krd} = kF + \mu\delta\gamma q, \quad (1)$$

где  $k$ ,  $\gamma$  - коэффициент сопротивления резанию и объемный вес грунта,

$\mu\delta = \mu_1 + \mu_2 \cos^2 \delta_p$ , здесь  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\delta_p$  - коэффициенты трения грунта по грунту и грунта по отвалу, угол резания бульдозера,

$\Phi_{krd}$  - удельное "динамическое" тяговое усилие, развиваемое агрегатом при действии вертикальных усилий на стадии копания и изменении (снижении) сцепного веса БА и являющееся отношением тягового усилия к полному весу БА, т.е. в его величине не учитывается изменяющийся сцепной вес БА. Следовательно, уравнение, связывающее удельные тяговые усилия ( $\Phi_{krd}$  и  $\Phi_{kr}$ ), которые развиваются при наличии вертикальных усилий  $\Phi_v$  и без последних, (уравнение связи масштабов удельных тяговых усилий в "динамике" и "статике") можно записать, как:

$$\Phi_{krd} = \Phi_{kr} * (1 + \Phi_v). \quad (2)$$

По результатам экспериментальных исследований рабочих процессов БА на грунтах различной плотности установлено:

$$\Phi_B = \alpha \Phi_{KPD} + B_1 , \quad (3)$$

где  $\alpha = 0,0192$ ;  $B_1 = -0,0663$  - для грунта I кат.( $c=3\dots 4$ )

$\alpha = 0,3253$ ;  $B_1 = -0,3034$  - для грунта II кат.( $c=6\dots 8$ )

$\alpha = 0,32$ ;  $B_1 = -0,3637$  - для грунта Шкат.( $c=9\dots 12$ ).

Уравнения (3) являются средними линиями регрессионных полей управления  $\{\Phi_B(\Phi_{KPD})\}$ , отражают идеальную взаимосвязь между  $\Phi_B$  и  $\Phi_{KPD}$  при копании и не зависят от системы управления.

Следовательно, значения “динамического” удельного тягового усилия и “динамической” тяговой мощности  $\eta_d$  при копании составят:

$$\Phi_{KPD} = B \Phi_{KPD}^* / (1 - \alpha \Phi_{KPD}^*) , \quad \eta_d = \Phi_{KPD} \dot{X}_d = B \eta_d^* / (1 - \alpha \eta_d^* / \dot{X}_d) ,$$

где  $B = B_1 + 1$ ,

$\eta_d^* = \Phi_{KPD}^* \dot{X}_d$  - “динамическая” тяговая мощность, развиваемая БА с учетом основных факторов тяговой динамики (снижения сцепных свойств, увеличения сопротивления передвижению), но не учитывающая смещение “динамических” уд. тяговых усилий относительно “статических” по (2),

$\dot{X}_d$  - реальная (“динамическая”) скорость БА.

Из уравнения “динамического” баланса мощностей БА имеем:

$$\eta^* = \eta_{st} - \Delta \eta_d - \Delta \eta_f ,$$

где  $\eta_{st} = \eta_k(1 - \delta_{st}) - f_{st} \dot{X}_{st}$  - “статическая” тяговая мощность, оцениваемая в обычных тяговых расчетах,

$\Delta \eta_d$ ,  $\Delta \eta_f$  - разницы мощностей на буксование и передвижение в “динамике” и “статике”, которые обусловлены снижением реальной скорости БА  $\dot{X}_d$ , вследствие разницы “динамической”  $\delta_d$  и статической  $\delta_{st}$  зависимости буксования при действии вертикальных усилий, и увеличением коэффициента сопротивления передвижению:

$$\Delta \eta_d = \eta_{st}(1 - K_v) - \Delta f \dot{X}_d (1/(1 - \delta_d) - 1) , \quad \Delta \eta_f = \Delta f \dot{X}_d / (1 - \delta_d) ,$$

где  $K_v = (1 - \delta_d) / (1 - \delta_{st})$  - коэффициент, учитывающий снижение скорости БА при копании,

$\Delta f = f_d - f_{st}$  - разница “динамического” и “статического” коэффициента сопротивления передвижению.

По Ю.В.Гинзбургу:

$$\delta_{st} = 1 - [1 - \Phi_{KPD} / \Phi_{KPDmax}(\Phi_B = 0)]^{0,05} , \quad \delta_d = 1 - [1 - \Phi_{KPD} / \Phi_{KPDmax}(\Phi_B)]^{0,15} .$$

Автором на основании экспериментальных исследований В.И.Барышева и Ю.Г.Попова получены следующие зависимости, связывающие  $\Phi_{KPDmax}$  и  $\Phi_B$  для БА и бульдозерно-рыхлительного агрегата (БРА) на базе трактора с трехточечной подвеской:

$$\Phi_{KPDmax} = [-442,67 \Phi_B^4 - 204,38 \Phi_B^3 - 26,01 \Phi_B^2 + 0,158 \Phi_B +$$

+ 1] \Phi\_{KPDmax}(\Phi\_B = 0) - для БА и  $-0,324 \ll \Phi_B \ll 0$  ,

$$\Phi_{KPDmax} = [-220,44 \Phi_B^4 - 114,34 \Phi_B^3 - 17,578 \Phi_B^2 + 0,0384 \Phi_B +$$

+ 1] \Phi\_{KPDmax}(\Phi\_B = 0) - для БРА и  $-0,365 \ll \Phi_B \ll 0$  ,

$$\Phi_{KPDmax} = \Phi_{KPDmax}(\Phi_B = 0) (1 + \Phi_B) - для \Phi_B > 0 .$$

По Ю.В.Гинзбургу:

$$\eta_d = f_m [1 - 0,375(1 - \Phi_m / \Phi_{max})^m], m = 0,15 + 0,1\dot{X}_t, C = 0,08 + 0,0035\dot{X}_t,$$

где  $\dot{X}_t$  - теоретическая скорость БА.

Следовательно:

$\eta^* = (\eta_{st} - \Delta f \dot{X}_{st}) K_v K_\Phi$ , где  $K_\Phi = 1 - \Delta f / \Phi_{kp}$  - коэффициент отражающий увеличение коэффициента сопротивления передвижению.

Таким образом, "динамическая" тяговая характеристика БА при копании с учетом снижения скорости, увеличения коэффициента сопротивления передвижению и преобразования масштабов удельного тягового усилия через "статическую" тяговую характеристику представится, как:

$$\eta_d = \frac{B[\eta_{st}(\dot{X}_{st}) - \Delta f \dot{X}_{st}] K_v}{1 - a \dot{X}_{st} [\eta_{st}(\dot{X}_{st}) - \Delta f \dot{X}_{st}]} \quad \text{или} \quad \eta_d = \frac{B[\eta_{st}(\Phi_{kp})] K_v K_\Phi}{1 - a K_\Phi / \Phi_{kp}} \quad (4)$$

"Статические" и "динамические" (при копании) тяговые характеристики БА на грунтах различных категорий в функции "статического" тягового усилия  $\Phi_{kp}$  представлены на рис.1, а "динамические" тяговые характеристики  $\eta_d(\Phi_{kp})$  - на рис.2.

Из (2)...(4) видно, что "динамическая" тяговая характеристика БА на стадии копания в соответствии с законом (3) является "скользящей" по ряду потенциальных характеристик с фиксированным значением сцепного веса:

$$\eta_d = (\eta_{st} - \Delta f \dot{X}_{st}) K_v (1 + \Phi_v) = \eta_{st} K_v K_\Phi (1 + \Phi_v), \text{ для которой}$$

$$\Phi_{kp} = (\Phi_{kp} - \Delta f) (1 + \Phi_v), \dot{X}_d = \dot{X}_{st} K_v. \quad (5)$$

Уравнения (5) представляют общий метод расчета "динамической" тяговой характеристики через показатели "статической" тяговой характеристики, который позволяет оценить соотношение между показателями "динамических" тяговых характеристик БА при различном сцепном весе. На самом деле, при заданном значении  $\eta_{st}(\dot{X}_{st})$  "статической" тяговой характеристики, являющейся своеобразной точкой отсчета, для известных  $\eta_d 1$ ,  $\Phi_{kp} 1$ ,  $\dot{X}_d 1$  и соответствующего им  $\Phi_v 1$  (сцепного веса) можно всегда установить соотношения с  $\eta_d 2$ ,  $\Phi_{kp} 2$ ,  $\dot{X}_d 2$  при другом  $\Phi_v 2$  (сцепном весе):

$$\eta_d 2 = \eta_d 1 (K_v 2 / K_v 1) (1 + \Phi_v 2) / (1 + \Phi_v 1), \Phi_{kp} 2 = \Phi_{kp} 1 (1 + \Phi_v 2) / (1 + \Phi_v 1), \dot{X}_d 2 = \dot{X}_d 1 K_v 2 / K_v 1. \quad (6)$$

Зависимости (5) и (6) являются универсальными правилами расчета показателей "динамических" тяговых характеристик БА при различном сцепном весе. Правила имеют первостепенное значение при установлении соотношений показателей тяговых характеристик агрегата на стадиях копания и транспортирования, необходимых для разработки метода оценки максимальной производительности БА и оптимизации его рабочего процесса в целом (при совместной оптимизации стадии копания и транспортирования):

$$\Phi_{tr} = \Phi_{kp} (1 + \Phi_{tr}) / (B + a \Phi_{kp}), \dot{X}_{tr} = \dot{X}_d K_{vtr} / K_v. \quad (7)$$

Правила дают необходимые для оптимизации рабочего процесса соотношения между краями диапазона силового регулирования, относящимися к тяговым характеристикам на стадиях копания и транспортирования,

$\eta_{ст}, \eta_d \text{ кВт/кН}$

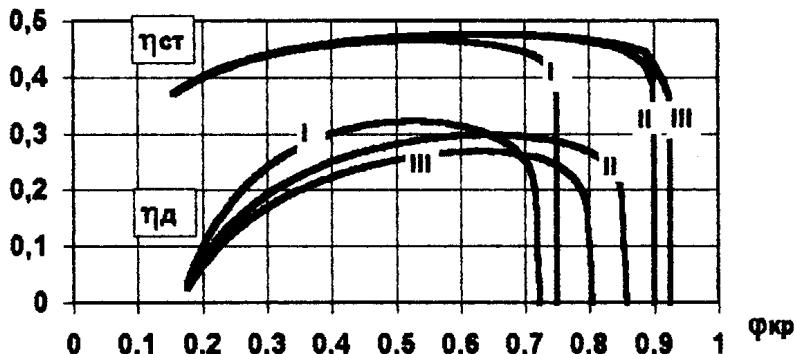


Рис.1 "Статические" и "динамические"( при копании) тяговые характеристики БА на грунтах различной плотности в зависимости от "статического" тягового усилия.

$\eta_d, \text{ кВт/кН}$

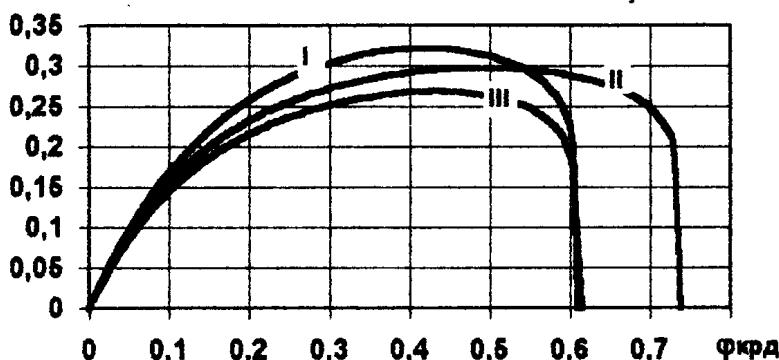


Рис.2 "Динамические"( при копании) тяговые характеристики БА на грунтах различной плотности

$\eta_d, \eta_{тр} \text{ кВт/кН}$



Рис.3 Соотношение тяговых характеристик БА при копании и транспортировании. Грунт III кат ( $c=9\dots 12$ )

а также позволяют оценить влияние системы управления на выбор оптимальных показателей тяговой характеристики (оценить изменение "динамических" тяговых характеристик при действии связанных между собой вариациях тягового сопротивления и вертикального усилия).

Тяговая характеристика БА при транспортировании в соответствии с (5) определяется следующим образом:

$$\eta_{tr} = (\eta_{st} - \Delta f \dot{X}_{st}) K_{tr} (1 + \Phi_{tr}), \text{ для которой}$$

$$\Phi_{tr} = (\Phi_{kr} - \Delta f) (1 + \Phi_{tr}), \dot{X}_{tr} = \dot{X}_{st} K_{tr}, \quad (8)$$

где  $K_{tr} = (1 - b_{tr}) / (1 - b_{st})$ , здесь  $b_{tr}$  - "динамическая" характеристика буксования при транспортировании при  $\Phi_{tr}$ .

В отличие от "скользящей" "динамической" тяговой характеристики БА при копании, как показали экспериментальные исследования, характеристика при транспортировании соответствует постоянному (стационарному)цепному весу. Причем, при разработке грунтов II и III категории на стадии транспортирования бульдозер практически всегда опускается на грунт и его вес  $G_b$  не участвует в тягообразовании. Это связано с тем, что с опущенным бульдозером оператору легче проводить транспортирование (часто используется плавающее положение распределителя) и на плотных грунтах нет опасности самозаглубления бульдозера. Напротив, на слабых грунтах I категории веса бульдозера достаточно для самозаглубления, он не опускается на грунт и в тягообразовании участвует полный вес БА.

Соотношение "динамических" тяговых характеристик при копании и транспортировании для грунта III категории представлено на рис.3.

Исходя из работ Б.М.Позина, уточненные (по входящим в них показателям соответствующих "динамических" тяговых характеристик) математические модели процессов копания и транспортирования представляются в следующем виде:

$$\text{копание} \quad \dot{q}(t) + \mu \delta \gamma / K \dot{X}_d(t) q(t) = 1 / K \eta_d(\dot{X}_d), \quad (9)$$

$$\text{где } q = 1 / k e^{-\mu \delta \gamma / K} \int_0^t \eta_d(\dot{X}_d) e^{\mu \delta \gamma / K} \dot{X}_d dt, \quad (10)$$

$\eta_d(\dot{X}_d)$  - по (4).

$$\text{транспортирование} \quad \eta_{tr} = (\eta_{st} - \Delta f \dot{X}_{st}) K_{tr} (1 + \Phi_{tr}), \quad (11)$$

где  $\eta_{tr}(\dot{X}_{tr})$  - по (8),  $\Phi_{tr}=0$  - для гр. I кат.,  $\Phi_{tr}=G_b$  - для гр. II и III кат.

Для основной технологии с отсыпкой грунта в кавальер стадия транспортирования разделяется на два участка: транспортирование в траншее ( $\Phi_{tr}^{tr} = \mu \delta \gamma q$ ), и на кавальере, где тяговое сопротивление возрастает по сравнению с развивающимся в траншее из-за угла  $\alpha$  наклона кавальера ( $\Phi_{tr}^{kav} = \Phi_{tr}^{tr} (1 + \operatorname{tg} \alpha / \mu \delta) + \operatorname{tg} \alpha$  - рассчитано с использованием универсальных правил (6)).

Метод оценки максимальной производительности БА путем поиска оптимального рабочего процесса

Процесс копания в соответствии с уточненной моделью (9) и ее решением (10) имеет ряд возможных решений со своими законами  $X_d(t)$  и  $\dot{X}_d(t)$  и множеством начальных условий по начальной скорости и набираемой призме, а

процесс транспортирования определяется величиной набранной на стадии копания призмы. Следовательно, при расчете производительности БА целесообразно нахождение ее максимальной величины, что эквивалентно задаче нахождения оптимального (обеспечивающего максимум производительности  $\Pi$ ) рабочего процесса БА и напрямую обеспечивает оптимизацию показателей его тяговой характеристики. Вне привязки к конкретной технологии задача формулируется следующим образом:

$$\Pi = q/T_{\text{ц}} = q/(T_{\text{к}} + T_{\text{тр}} + T_{\text{ост}} + T_{\text{хх}}) = q/[L_{\text{k}}(1/\dot{X}_{\text{д}} - 1/\dot{X}_{\text{тр}}) + L/\dot{X}_{\text{тр}} + T_{\text{ост}} + T_{\text{хх}}] \rightarrow \max,$$

где  $T_{\text{ц}}$ ,  $T_{\text{к}}$ ,  $T_{\text{тр}}$ ,  $T_{\text{ост}}$ ,  $T_{\text{хх}}$ ,  $L_{\text{k}}$ ,  $L$  - продолжительности цикла, копания, транспортирования, технологических остановок, холостого хода, дистанция копания, длина разрабатываемого забоя, соответственно.

Для максимизации функционала  $\Pi$  при равных условиях (одинаковой  $q$  и следовательно  $\dot{X}_{\text{тр}}$ , а также одинаковых  $T_{\text{ост}}$ ,  $T_{\text{хх}}$ ,  $L$ ) необходимо обеспечить максимум средней скорости рабочего хода или минимизировать показатель  $L_{\text{k}}(1/\dot{X}_{\text{д}} - 1/\dot{X}_{\text{тр}})$ . Задача нахождения процесса с максимальной средней скоростью копания решается в соответствии с системой:

$$(12) \quad \left\{ \begin{array}{l} \dot{X}_{\text{д}}(L_{\text{k}i}) \Rightarrow \max(L_{\text{k}i}) = \dot{X}_{\text{дmax}}, \\ L_{\text{k}i} \in [0, L], i \in N, \\ \Pi_{\text{max}} = \Pi(\min[L_{\text{k}i}(1/\dot{X}_{\text{дmax}} - 1/\dot{X}_{\text{тр}})]) \end{array} \right.$$

То есть поиск оптимального процесса проводится на всех возможных дистанциях копания  $L_{\text{k}i}$ , для каждой из которых ищется процесс копания, обеспечивающий максимум средней скорости  $\dot{X}_{\text{дmax}}$  на данной дистанции, а из всех процессов копания, оптимальных на конкретных дистанциях, окончательно выбирается процесс, обеспечивающий максимум средней скорости рабочего хода. Систему (12) можно решить прямым способом как для БА с автоматической МТУ (ГМТ, ДПМ+МСТ, ЭМТ), использующего определенный участок потенциальной тяговой характеристики, так и для БА с дизелем+МСТ, работающего при копании на стационарном скоростном режиме.

Для БА с автоматической МТУ, во-первых, исходя из модели копания (9) и ее решения (10), выделяется класс движений, который на малых дистанциях копания является единственным оптимальным, определяемым методами вариационного исчисления путем максимизации функционала  $\int \eta_{\text{д}}(\dot{X}_{\text{д}}) e^{\mu t / K_{\text{д}}} \dot{X}_{\text{д}} dt$ :

$$\eta_{\text{д}} \ddot{X}_{\text{д}} + \mu \dot{y} / K_{\text{д}} \dot{X}_{\text{д}}' \dot{X}_{\text{д}} + \mu \dot{e} y / K_{\text{д}} = 0. \quad (13)$$

Во-вторых, из всех других классов непрерывных движений при копании, которые могут обеспечить максимум средней скорости рабочего хода, выделяются движения с постоянной скоростью (стационарные процессы), максимизирующие длину копания.

Анализ и численные расчеты для БА с автоматической МТУ показали, что вследствие более низких показателей "динамической" тяговой характеристики на стадии копания по сравнению со стадией транспортирования, скорость транспортирования всегда значительно выше скорости копания. Поэтому для достижения максимума  $\Pi$ , необходимо выполнять копание на малой дистанции, чтобы как можно большую часть забоя проходить в быстром транспортном режиме, что дает только эйлеровский процесс (13). Для модели максимальной производительности, не учитывающей наличие вертикальных

усилий и различие тяговых характеристик на стадиях копания и транспортирования, оптимальны стационарные процессы копания. Это кардинально меняет подход к оптимизации рабочих процессов и показателей тяговой характеристики. Таким образом, экстремали, удовлетворяющие процессам (13) и проверенные на общую оптимальность в сравнении со стационарными процессами, являются оптимальными процессами копания БА с автоматической МТУ.

Задача нахождения максимальной производительности  $P_{\max}$  БА с автоматической МТУ связана с поиском наилучших начальных условий  $\dot{X}_{\text{д нач}}$  и  $q$  (т.е. оптимального диапазона  $\Phi_{\text{кр нач}} \dots \Phi_{\text{кр кон}}$  и  $\Phi_{\text{кр нач}} \dots \Phi_{\text{кр кон}}$ ) - система (14), а для БА с дизелем+МСТ - с поиском оптимальных постоянных скоростей  $\dot{X}_d$  ( $\Phi_{\text{кр д}}$  и  $\Phi_{\text{кр}}$ ) - система (15). Системы (14) и (15) отражают метод расчета максимальной производительности БА. Для проведения численного решения системы были конкретизированы для базовой технологии с отсыпкой грунта в кавальер (с учетом снижения набираемой призмы при росте угла кавальера) и для технологии с отсыпкой в вал.

$$(14) \quad \left\{ \begin{array}{l} \eta_d \ddot{X}_d + \mu \delta \gamma / K_t \eta_d \dot{X}_d + \mu \delta \gamma / K_t \eta_d = 0 \\ q_j = 1 / e^{-\mu \delta \gamma / K_t \eta_d} \int_{\eta_d}^{\eta_{\text{кр}}} \eta_d (\dot{X}_d) e^{\mu \delta \gamma / K_t \eta_d} d\eta_d, \\ \dot{X}_d = \dot{X}_d(t), \dot{X}_d = \dot{X}_d(t), \dot{X}_d(0) = \dot{X}_{\text{д нач}} \in \dot{X}_d(\eta_d), \\ \dot{X}_{\text{тр}} = \dot{X}_{\text{тр}}(q_j) \in \dot{X}_{\text{тр}}(\eta_{\text{тр}}), i, j \in N, \\ P_{\max} = \max \Pi_{ij} [\dot{X}_{\text{д нач}}, q_j, \dot{X}_{\text{тр}}(q_j)] \end{array} \right.$$

$$(15) \quad \left\{ \begin{array}{l} q_j = \eta_d (1 - e^{-\mu \delta \gamma / K_t \eta_d}) / \mu \delta \gamma \dot{X}_d, \\ \dot{X}_d = \text{const} \in \dot{X}_d(\eta_d), \dot{X}_{\text{тр}} = \dot{X}_d K_{\text{тр}} / K_v, i, j \in N, \\ P_{\max} = \max \Pi_{ij} [\dot{X}_d, q_j, \dot{X}_{\text{тр}}] \end{array} \right.$$

Численные расчеты проведены для грунтов I, II и III категории. Пример расчетных зависимостей производительности по базовой технологии на грунте III категории для БА с автоматической МТУ (при удельной мощности 0,668 кВт/кН,  $\eta_k = 0,569$  кВт/кН,  $G_a = 187$  кН) представлены на рис. 4, а вид оптимального процесса копания - на рис 5. Результаты расчетов показывают следующее.

#### Для БА с автоматической МТУ

При осуществлении копания с начальными усилиями  $\Phi_{\text{кр нач}}(\Phi_{\text{кр нач}})$ , отличающимися в несколько (в 5..8) раз, конечное усилие  $\Phi_{\text{кр кон}}(\Phi_{\text{кр кон}})$  изменяется незначительно (на 3,3..8,7%). Это является одним из главных свойств оптимального процесса копания. Значения границ оптимальных диапазонов "статических" тяговых усилий  $\Phi_{\text{кр}}$  в зависимости от коэффициента приспособляемости D МТУ с точностью до 1,3% составляют:

$$\Phi_{\text{кр нач}} = mD^n, \Phi_{\text{кр кон}} = D\Phi_{\text{кр нач}} + f_{\text{ср}}(D-1),$$

где

$$m=0,6995; n=-1,2865 \text{ - для грунта I кат.,}$$

$$m=0,8445; n=-1,2142 \text{ - для грунта II кат.,}$$

$$m=0,7758; n=-1,2212 \text{ - для грунта III кат.}$$

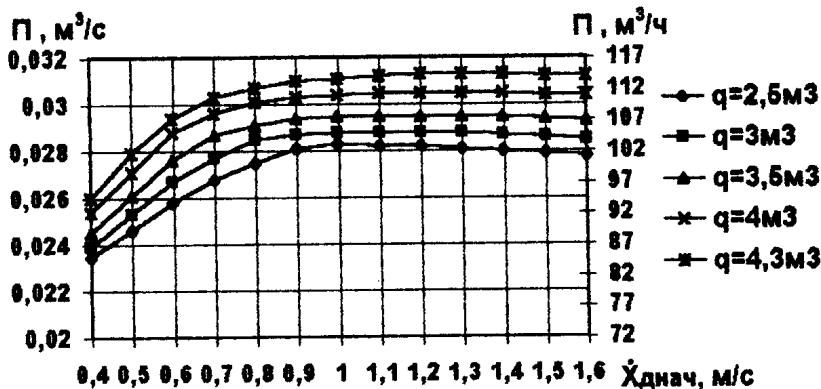


Рис.4 Расчетные зависимости  $\Pi$  для БА с авт. МТУ от начальных условий ( $\dot{X}_{дач}$  и емкости отвала  $Q$ ). Грунт III категории.

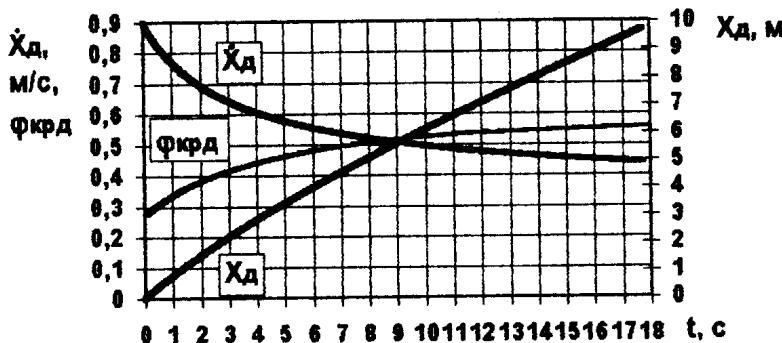


Рис.5 Параметры оптимального процесса копания для БА с авт. МТУ. Грунт III категории.

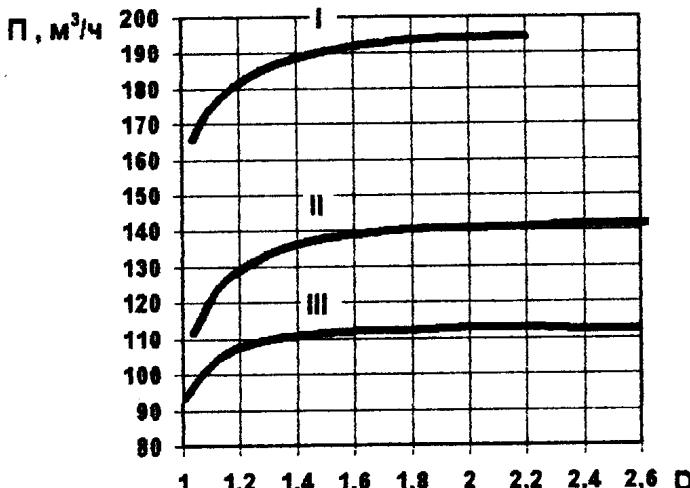


Рис.6 Зависимость  $\Pi$  от коэффициента приспособляемости МТУ  $D$  на грунтах различной плотности.

Снижение D с величин 1,97...2,37, обеспечивающих максимум производительности по базовой технологии, до 1,6 не вызывает существенного снижения производительности ( $\Delta P$ , равный процентной разнице максимальной и достигаемой производительности не превышает 2%) - рис.6.  $\Delta P$  является одним из факторов при выборе рабочих тяговых диапазонов БА. Вторым фактором является возможность совмещения рабочих диапазонов при разработке грунтов различной плотности, т.е. снижение числа рабочих передач, который реализуется путем совмещения соответствующих нижних границ Фирнеч. Совместный анализ зависимостей  $\Delta P(D)$  и  $D(\text{Фирнеч})$  показывает, что при любом  $\Delta P$  наибольший D необходим и должен приниматься для МТУ по грунту II категории, а тяговый диапазон для грунта III категории при любом  $\Delta P$  всегда попадает в диапазон для грунта II категории. Следовательно, для эффективной разработки грунтов всех категорий требуется не более двух рабочих передач.

При  $\Delta P=2\%$  и  $D=1,6$  для двух рабочих передач оптимальные диапазоны "статических" тяговых БА составляют:

$$\begin{aligned} \text{I передача (грунты II и III кат.)} & - 0,477 \dots 0,812, \\ \text{II передача (грунт I кат.)} & - 0,385 \dots 0,66. \end{aligned} \quad (16)$$

Диапазоны (16) рекомендуются для БА с дизелем+ГМТ, ДПМ+МСТ.

При  $\Delta P=2\%$  для одной рабочей передачи, охватывающей все грунты, оптимальный диапазон "статических" тяговых усилий составляет:

$$0,408 \dots 0,812 \text{ при } D=1,83. \quad (17)$$

Диапазон (17) рекомендуется для БА с ДПМ+ГМТ, перспективными ДПМ+МСТ, дизелем+ЭМТ.

При использовании МТУ с  $1,4 < D < 1,6$  выбор оптимального тягового диапазона с точностью до сотой доли можно осуществлять при фиксированной верхней границе диапазона, соответствующего  $D=1,6$ . Снижение D ниже 1,4 нецелесообразно, поскольку вызывает прогрессивное увеличение  $\Delta P$  (при  $D=1,4$   $\Delta P=4\%$ ). Увеличение D выше рекомендованных по (16) и (17) нецелесообразно поскольку зависимость  $P(D)$  носит характер кривой "насыщения".

#### Для БА с дизелем и МСТ

Для эффективной разработки грунтов трех категорий также требует не более двух рабочих передач, при этом оптимальные "статические" тяговые усилия составляют:

$$\begin{aligned} \text{I передача (грунты II и III кат.)} & - 0,696 \dots 0,699, \\ \text{II передача (грунт I кат.)} & - 0,639. \end{aligned} \quad (18)$$

#### Для базового трактора

Оптимальные диапазоны и величины удельных тяговых усилий определяются с учетом веса базового трактора  $G_t$  и навесного оборудования  $G_{no}$ , для чего оптимальные усилия агрегата увеличиваются в  $(1 + G_{no}/G_t)$  раз.

Представленные результаты справедливы для БА любого веса, поскольку расчеты проведены в удельном представлении. Дополнительно установлено, что изменение удельной мощности БА в диапазоне  $(0,59 \dots 0,8)\text{kBt/kN}$  не требует изменения оптимальных тяговых диапазонов, а вызывает увеличение

рабочих скоростей ( $\dot{X}_{\text{днac}}$  для БА с автоматической МТУ увеличивается на 0,135м/с при увеличении удельной мощности на 0,1кВт/кН).

Производительность БА с автоматической МТУ на грунтах различной плотности выше, чем у БА с дизелем и МСТ на 22...39% при соответствующих оптимальных показателях тяговых усилиях и одинаковом уровне потенциальной тяговой характеристики обоих БА.

#### Влияние системы управления рабочим органом на выбор оптимальных показателей тяговой характеристики БА

Представленные расчеты отражают идеальные "программные" процессы. В связи с чем, были оценены условия осуществимости оптимальных процессов при влиянии дополнительных факторов нагружения БА, обусловленных последовательным циклическим управлением БА при копании с циклом "вывешивание - непосредственное копание - принудительное выглубление - промежуточное копание". Так как на участках непосредственного и промежуточного копания БА работает без отбора мощности двигателя, а при манипуляциях - с отбором, влияние факторов нагружения на участках копания и при манипуляциях изучено отдельно.

Построение огибающих, соответствующих средним амплитудным значениям центрированных вариаций тягового сопротивления и вертикального усилия, полученных по результатам экспериментальных исследований БА с автоматической МТУ и обычной гидросистемой управления (распределитель с нормально включенной нейтралью), показало, что для БА с такой системой при условии сохранения D целесообразно смещение верхних границ оптимальных диапазонов до максимальных усилий по сцеплению:

для двух передач

$$\text{I передача (грунты II и III кат.)} - 0,533 \dots 0,9 ,$$

$$\text{II передача (грунт I кат.)} - 0,438 \dots 0,75 . \quad (19)$$

$$\text{для одной передачи} - 0,456 \dots 0,9 . \quad (20)$$

По мере развития систем управления и снижения вариаций рабочие тяговые диапазоны необходимо приближать к оптимальным по (16), (17).

По результатам экспериментальных исследований величину отбора мощности на манипуляции, необходимую для гарантированного обеспечения уровня эффективности БА, при проектировании и в тяговых расчетах рекомендуется учитывать в величине удельной мощности БА следующим образом: для БА с МСТ - 0,184 кВт/кН, для БА с ГМТ - 0,195 кВт/кН. Указанные величины учитывают отбор мощности на гидропривод при манипуляциях принудительного выглубления и на дополнительное нагружение МТУ через ведущие колеса (конечные передачи), возникающее при данных манипуляциях. Использование заниженных величин отбора мощности, полученных осреднением отбора за время рабочего хода, нежелательно, поскольку может вызвать перегрузки МТУ на стадии копания. Учет отбора мощности не требует изменения диапазонов (величин) оптимальных тяговых усилий и D при условии сохранения скоростных скоростных режимов МТУ.

Во втором блоке теоретических исследований решена задача о возможности разработки энергетического критерия эффективности промышленного трактора, сформулированная в виде двух условий: необходимого (условия

непротиворечивости энергетического критерия критерию производительности) и достаточного (условия прямого соответствия).

Необходимое условие сформулировано в виде теоремы, в которой показано, что для энергетического критерия, представляемого, в частности, в виде МПП, тяговая мощность при копании должна быть представлена в позиционном виде, т.е. представляться в функции пути. Теорема доказана на основе рассмотрения частных случаев задачи Лагранжа в вариационном исчислении и условия оптимальности нестационарных процессов копания.

Достаточное условие предполагает прямое соответствие производительности и энергетического критерия, иначе разработка последнего теряет практический смысл. С учетом закономерностей работы БА на стадиях копания и транспортирования было получено выражение, связывающее МПП и производительность:

$$MPP = P[k + \mu \delta \gamma (L - L_k)] + \mu \delta \gamma / T_{q \bar{q}} \int_{T_k}^{T_k} q(t) \dot{X}_d(t) dt \quad (21)$$

Из (21) видно, что однозначно поставить в соответствие величину МПП и производительности невозможно, а достаточное условие невыполнимо без задания закона копания. В связи с чем, учитывая возможность прямой оптимизации закона копания по критерию производительности, последняя является единственным целесообразным критерием для теоретической оценки эффективности промышленных тракторов.

В третьем блоке теоретических исследований разработан критерий для экспериментальных исследований и испытаний, соответствующий критерию производительности и позволяющий проводить оценку эффективности промышленных тракторов без испытаний на техническую производительность или при минимальном их объеме (для оценки параметров рабочего органа).

Критерий МПП (при выполнении необходимого условия) в экспериментальном плане также неудобен, поскольку оценка производительности по его величине требует оценки набираемой призмы грунта.

Новый критерий (эквивалент производительности ЭП) разработан исходя из решения (10) математической модели копания:

$$\text{ЭП} = 3600 q / T_{q \bar{q}} = 3600 / T_{q \bar{q}} k e^{-\mu \delta \gamma / k L_k} \int_{T_k}^{T_k} \dot{X}_d(t) e^{\mu \delta \gamma / k X_d(t)} dt, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (22)$$

где  $T_{q \bar{q}} = T_k + T_{tr^{pr}} + T_{tr^{kav}} + T_{ost} + T_{kh}$ , с,

здесь  $T_{tr^{pr}} = (L - L_k) / [2 \dot{X}_{tr^{pr}}(q)]$ ,  $T_{tr^{kav}} = L_{kav} / \dot{X}_{tr^{kav}}$  - средние продолжительности транспортирования в траншее и на кавальере, с, здесь  $\dot{X}_{tr^{pr}}$ ,  $\dot{X}_{tr^{kav}}$  - скорости транспортирования в траншее и на кавальье, м/с.

ЭП имеет размерность производительности, а его оценка предполагает проведение тягово-динамических испытаний с имитацией нагружения трактора при копании и транспортировании.

В третьей главе сформулированы цели и задачи, изложена методика экспериментальных исследований, проведена оценка точности полученных параметров, представлены и проанализированы основные результаты исследований. Экспериментальная часть работы содержит два блока.

В первом блоке представлены результаты исследований рабочих процессов агрегата Б10.02 с автоматической МТУ(ГМТ) методами тензометрии. Испытания проведены на суглинках I ( $c=3 \dots 4$ ), II ( $c=6 \dots 8$ ), и III ( $c=9 \dots 12$ )

категорий, с различными видами бульдозеров(прямой и полусферический) и с различными операторами. Результаты испытаний явились основой для разработанных критериальных моделей и методов оценки эффективности и показали следующее.

Нагружение БА тяговыми сопротивлениями и вертикальными усилиями имеет выраженную нестационарность, заключающуюся: в нестационарности процессов на стадии копания (с переменным математическим ожиданием - трендом) при стационарных процессах на стадии транспортирования в траншее; в частотной нестационарности (наличии колебаний с частотами  $(0,1\dots1)$  Гц на стадии копания, обусловленных циклическим управлением БА, и значительным снижением колебаний на стадии транспортирования) (рис.7).

Ни одна из 27 зачетных реализаций параметров БА на рабочем ходу (по 9 на каждой из категорий грунтов) не удовлетворяла требованиям (тесту) стационарности.

Для анализа нагружения агрегата на стадии копания для каждой зачетной реализации проведено выделение низкочастотных линейных трендов  $\Phi_{\text{ирд}}(t)$  и  $\Phi_{\text{вт}}(t)$ , центрирование колебаний относительно трендов и их раздельный анализ.

Рассмотрение параметров трендов  $\Phi_{\text{ирд}}(t)$  показало, что диапазон регулирования тягового сопротивления на стадии копания не зависит от продолжительности стадии и набираемой призмы, что аналогично свойству оптимального процесса копания. Ордината линейного тренда  $\Phi_{\text{ирд}}(t)$  проходит в целом ниже ординаты нелинейного оптимального закона копания, что объясняется влиянием системы управления, однако диапазон силового регулирования для обоих видов "программных" траекторий практически совпадает. Параметры усредненных трендов  $\Phi_{\text{ирд}}(t)$  и средняя удельная продолжительность стадии копания от времени рабочего хода  $T_{\text{px}}$  составили:

$$\text{для грунта I кат. } \Phi_{\text{ирд}}(t)=0,408t/T_{\text{px}}+0,234, \bar{T}_{\text{к}}=0,24T_{\text{px}},$$

$$\text{для грунта II кат. } \Phi_{\text{ирд}}(t)=0,463t/T_{\text{px}}+0,224, \bar{T}_{\text{к}}=0,34T_{\text{px}},$$

$$\text{для грунта III кат. } \Phi_{\text{ирд}}(t)=0,336t/T_{\text{px}}+0,235, \bar{T}_{\text{к}}=0,41T_{\text{px}}. \quad (23)$$

Статистическая оценка центрированных колебаний тягового сопротивления и вертикального усилия показала, что они стационарны, имеют одинаковую частотную структуру и высоко коррелированы между собой. Основная энергия колебаний расходуется в спектре частот  $(0,1\dots0,5)$  Гц, который формируется последовательным циклическим управлением БА при копании. Средние значения частот управления составили  $(0,3\dots0,37)$  Гц. Высокая корреляция (по параметрам взаимокорреляционной функции) центрированных колебаний тягового сопротивления и вертикального усилия обусловлена их функциональной взаимосвязью на участках непосредственного и промежуточного копания, как составляющих единого сопротивления копанию.

При транспортировании призмы грунта в траншее стационарное тяговое сопротивление практически всегда попадает в диапазон силового регулирования при копании, а стационарное вертикальное усилие определяется тем, что бульдозер либо опускается (грунты II и III кат.), либо не опускается (I кат.)

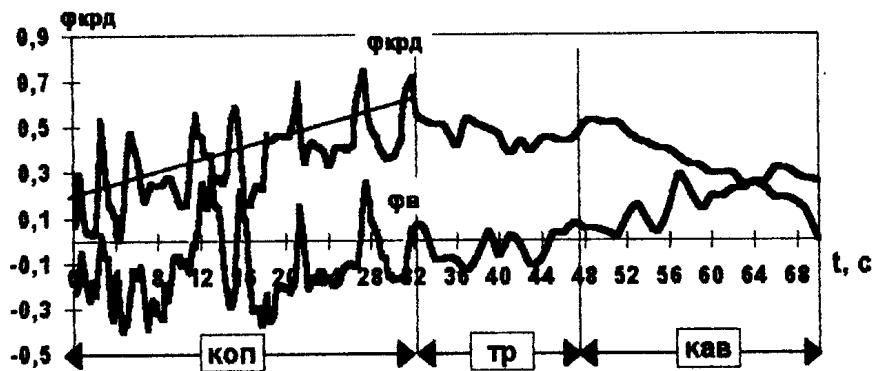


Рис.7 Пример реализации тягового сопротивления и вертикального усилия при рабочем ходе БА. Грунт III кат.

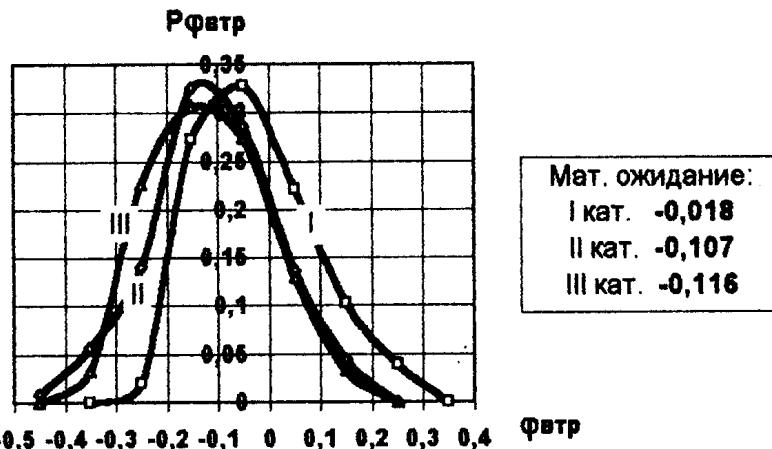


Рис.8 Распределения вероятностей вертикального усилия при транспортировании призмы в траншее на грунтах различной плотности. Грунт III кат.

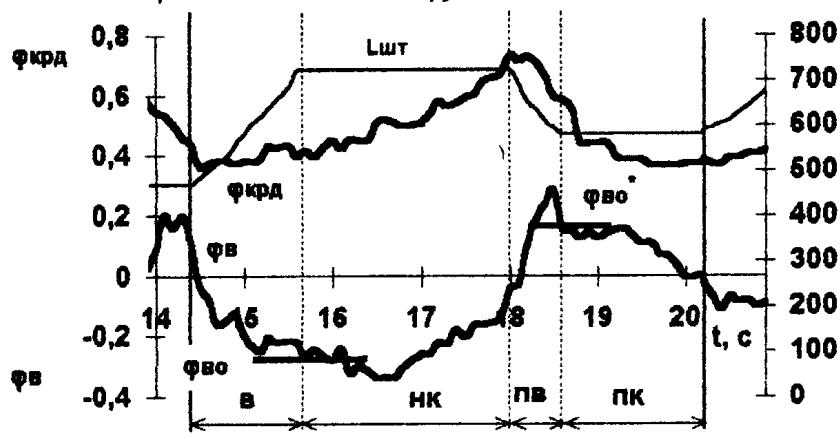


Рис.9 Типичный цикл управления при копании.

на грунт (рис.8, для испытанного БА  $G_6=0,11G_a$ ).

Нагружение агрегата при транспортировании на кавальере нестационарно. В момент выезда на кавальер агрегат развивает наибольшее тяговое усилие, затем по мере отсыпки грунта оно постепенно снижается, а вертикальное усилие возрастает, догружая БА весом призмы при каскаде манипуляций подъема бульдозера, и может достигать  $(0,3...0,4)G_a$ .

Изучение закономерностей действия вертикальных усилий на стадиикопания показало, что БА, в отличие от обычной тяговой машины, является объектом с переменным управляемым сцепным весом, а вертикальное усилие при копании является суммой реакций грунта на весовое управляющее усилие агрегата и вертикальной составляющей сопротивления копанию.

На рис.9 представлен типичный цикл управления БА, последовательно выполняемый при копании. При манипуляции вывешивания БА (В) осуществляется перераспределение части его веса на грунт через рабочий орган для создания напорного давления на режущей кромке ножа, в результате по завершению манипуляции устанавливается усилие управления  $\Phi_{vo}$ . При действии  $\Phi_{vo}$  на наиболее продолжительном участке непосредственного копания (НК) при выключенной системе управления происходит увеличение глубины копания, горизонтальной и вертикальной составляющих сопротивления копанию (самозаглубление). Далее оператор вынужден осуществить манипуляцию принудительного выглубления (ПВ), при которой происходит обратное перераспределение веса (догрузка БА со стороны грунта, находящегося над отвалом) и создается обратное усилие управления  $\Phi_{vo}^*$ . При действии  $\Phi_{vo}^*$  на следующем участке промежуточного копания (ПК) при выключенной системе управления осуществляется окончательное выглубление отвала и снижение тягового сопротивления (самовыглубление).

Так как регулирование тягового сопротивления осуществляется в пределах усилий управления:  $\Phi_{krd}[\Phi_{vo}(t)] \dots \Phi_{krd}[\Phi_{vo}^*(t)]$ , т.е. на участках непосредственного и промежуточного копания, для каждой категории грунта были получены регрессионные поля управления  $\{\Phi_v(\Phi_{krd})\}$  (Рис.10). Средние линии  $\Phi_v(\Phi_{krd})$  этих полей отражают идеальную (вне зависимости от системы управления) взаимосвязь между вертикальными усилиями и тяговыми сопротивлениями, “вокруг” них выполняется копание и изменяется сцепной вес БА. Нижним границам полей соответствуют усилия управления  $\Phi_{vo}$ , верхним -  $\Phi_{vo}^*$ . Ординаты полей и средних линий определяются прочностными свойствами грунта (на более плотных грунтах требуется оказывать большее напорное давление на режущей кромке и большее весовое напорное усилие БА  $\Phi_{va}=-\Phi_{vo}$ ), при этом видно, что при копании плотных грунтов сцепной вес БА в среднем существенно снижается, но не остается постоянным. Наклон полей и средних линий связан с тем, что по мере набора призмы грунта и роста  $\Phi_{krd}$  возрастает вертикальная составляющая сопротивления копанию  $\Phi_{vk}$ , действующая на отвал сверху вниз, и для достижения потребного напорного давления на режущей кромке требуется меньшее вывешивание агрегата. Практическое отсутствие наклона поля на грунте I категории связано с малы-

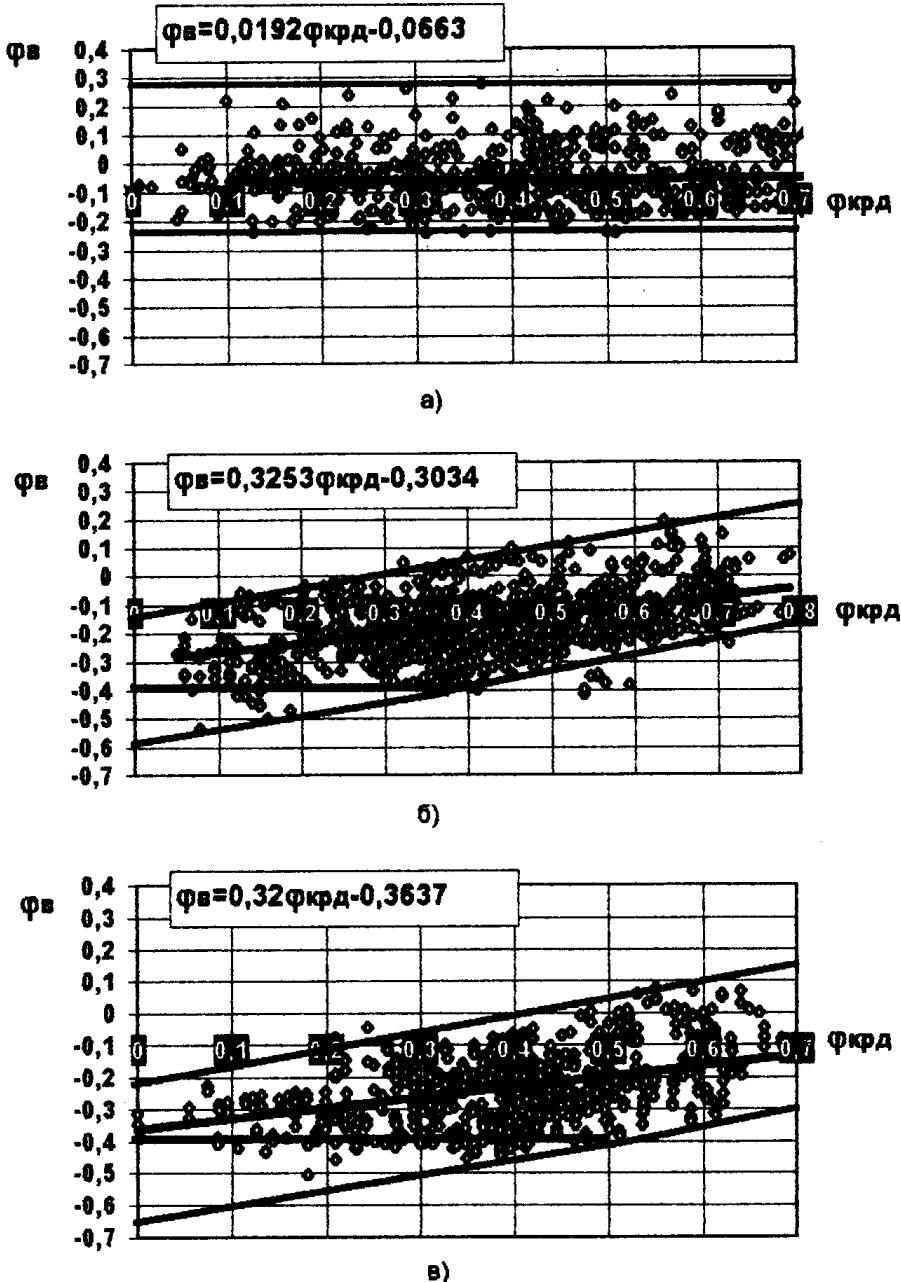


Рис.10 Регрессионные поля управления  $\{\Phi_v(\Phi_{krd})\}$  со средними линиями регрессии  $\Phi_v(\Phi_{krd})$  при копании грунтов различной плотности:  
 а) - грунт I категории ( $c=3 \dots 4$ );  
 б) - грунт II категории ( $c=6 \dots 8$ );  
 в) - грунт III категории ( $c=9 \dots 12$ ).

ми потребными давлениями. Ширина полей обусловлена характеристиками системы управления. Внутри полей располагаются величины Фв, действующие на БА на участках непосредственного и промежуточного копания при соответствующих усилиях управления Фво и Фво\*.

Для оценки потребных напорных давлений на режущей кромке, обеспечивающих эффективную разработку грунтов различной плотности, дополнительно изучены закономерности вертикальной и горизонтальной составляющих сопротивления копанию при действии различных начальных порных усилий (давлений) на режущей кромке ножа  $|\Phi_{vk}| = \Phi_{va0} + \Phi_{vk}^*$ . Изучение участков непосредственного копания показало следующее:

- горизонтальная составляющая (тяговое сопротивление) при действии начальных напорных давлений на кромке возрастает по линейному, а вертикальная - параболическому закону:

$$\Phi_{krd}(t) = Agt + \Phi_{krd0}, \quad \Phi(t) = Avt^2 + Bvt + \Phi_{vo};$$

- чем выше величина начального напорного усилия (давления) на кромке, тем выше скорость нарастания горизонтальной  $\dot{\Phi}_{krd} = Ag$  вертикальной  $\dot{\Phi}_v$  составляющих сопротивления копанию. Существуют такие низкие напорные давления, при которых копание не возможно ( $\Phi_{krd} \leq 0$ ) и отвал выталкивается из массива грунта;

- эмпирические зависимости вертикальной и горизонтальной составляющих имеют следующий вид:

$$\Phi_v = A(\Phi_{krd} - \Phi_{krd0})^2 + B(\Phi_{krd} - \Phi_{krd0}) + \Phi_{vo} \text{ или } \Delta\Phi_v = A\Delta\Phi_{krd}^2 + B\Delta\Phi_{krd}, \quad (24)$$

где  $A = Av/Ag^2$ ,  $B = Bv/Ag$ .

Коэффициенты  $Ag$ ,  $Av$  и  $Bv$  испытывают тесную корреляционную связь с величиной начального напорного усилия на кромке (табл.1):

$$Ag = Ag1\Phi_{vkro} + Ag2, \quad Av = Av1\Phi_{vkro}^2 + Av2\Phi_{vkro} + Av3, \quad Bv = Bv1\Phi_{vkro} + Bv2.$$

Таблица 1

коэффициенты	грунт I кат.	Грунт II кат.	грунт III кат.
Ag1	-1,047	-0,967	-0,666
Ag2	0,016	-0,089	-0,089
коэф. корр. Ag(Φvkro)	0,794	0,758	0,792
Av1	22,477	3,97	3,722
Av2	6,308	1,71	1,633
Av3	0,438	0,227	0,185
коррел. отнош. Av(Φvkro)	0,736	0,611	0,744
Bv1	-1,147	-0,827	-0,432
Bv2	-0,151	-0,149	-0,121
коэф. корр. Bv(Φvkro)	0,843	0,703	0,88

Для применения зависимости (24) к БА различных классов и бульдозерам различных типоразмеров необходимо использовать зависимость, связываю-

шую Фикро с давлением рикро (в МПа) на режущей кромке для испытанного БА:

$$\Phi_{икро} = SkpCOS\delta p_{икро}/G_a = 0,1043p_{икро}, \quad (25)$$

где  $Skp=0,034m^2$ ,  $\delta p=55^\circ$ ,  $G_a=187kN$  - площадь режущей кромки, угол резания бульдозера и вес испытанного БА, соответственно.

- для достижения одних скоростей  $\dot{\Phi}_{икрд}$  на более плотных грунтах требуется развивать большее напорное давление на кромке и большее вывешивание БА. Анализ вероятностей  $\dot{\Phi}_{икрд}$  показывает, что операторы высокой квалификации устанавливают такие напорные давления, которые обеспечивают одинаковую  $\dot{\Phi}_{икрд}$ , независимо от плотности разрабатываемого грунта (для испытанного агрегата  $0,156 \text{ c}^{-1}$ ).

Величины потребных напорных давлений на режущей кромке, обеспечивающих эффективную (с наиболее вероятной  $\dot{\Phi}_{икрд}$ ) разработку грунтов различной плотности, и давлений, ниже которых копание не возможно, определенные с учетом регрессионных зависимостей  $\dot{\Phi}_{икрд}=A_g(\Phi_{икро})$  и зависимости (25), составляют, соответственно:

для грунта I кат. -	1,2 МПа и 0 МПа,
для грунта II кат. -	2,4 МПа и 0,9 МПа,
для грунта III кат.-	3,4 МПа и 1,2 МПа.

- максимальное весовое напорное усилие БА следует квалифицировать, как один из базовых параметров БА, и должно выбираться из условия:

$$\Phi_{вамакс} \geq p_{икро}^{III} SkpCOS\delta p_{Кизн}/G_a,$$

где  $p_{икро}^{III}$  - потребное напорное давление для грута III категории,

$K_{изн}=\frac{h_{икр}}{h_{изн}}$  - коэффициент запаса по износу ножа, здесь  $h_{икр}$ ,  $h_{изн}$  - толщина режущей кромки нового и изношенного ножа.

Экспериментальное изучение факторов нагружения БА, связанных с системой управления, включало отдельное изучение процессов манипуляций рабочим органом и взаимосвязанных центрированных вариаций тягового сопротивления и вертикального усилия. Для оценки вариаций проведена схематизация типичного цикла управления, центрирование процессов тягового сопротивления и вертикального усилия без участков манипуляций и оценка средних величин вариаций, относящихся к началам и концам участков непосредственного и промежуточного копания. Исследования процессов манипуляций показало, что средний отбор мощности двигателя на гидропривод  $\Delta N_{ги}$  при манипуляциях принудительного выглубления ( $11,7\ldots14,3\%$  мощности двигателя) намного выше, чем при манипуляциях вывешивания ( $4,0\ldots4,7\%$ ). Причем, для манипуляций принудительного выглубления характерен еще один фактор, вызывающий дополнительный отбор мощности  $\Delta N_p$  - возникновение дополнительных реактивных моментов сопротивления на ведущих колесах (в конечных передачах) при силовом угловом прокачивании остова с увеличением касательного усилия  $\Phi_k$  в среднем на  $5,1\ldots13,7\%$ . Учитывая одинаковую необходимость выполнения обоих видов манипуляций при циклическом управлении, для исключения перегрузок МТУ целесообразно

принимать в качестве потребного отбор мощности на манипуляции принудительного выглубления, который по обоим факторам составляет (в кВт/кН):

	$\Delta N_{\text{пп}}$	$\Delta N_{\text{р}} (\text{БА с МТ/ГМТ})$	$\Delta N_{\text{ман}} (\text{БА с МТ/ГМТ})$
на грунте I кат.	0,092	0,092 / 0,103	0,184 / 0,195
на грунте II кат.	0,078	0,034 / 0,038	0,112 / 0,116
на грунте III кат.	0,096	0,047 / 0,053	0,143 / 0,149 . (26)

При исследованиях манипуляций также определены: их средняя и удельная суммарная (от времени копания) продолжительность, давление развиваемое гидроприводом, величины положительных вертикальных усилий при манипуляциях принудительного выглубления и другие параметры.

Во втором блоке экспериментальных исследований представлены результаты лабораторно-полигонных испытаний опытного БА Б170М.03-51В с ДПМ Д-160ПМ и параметрами тяговой характеристики, обоснованной в теоретической части работы ( $D=1,6$ ,  $\varphi_{\text{кр}}=0,48 \dots 0,816$ ). Испытания БА на техническую производительность (табл.2) подтвердили высокую адекватность теоретических положений работы (метода оценки производительности, оптимальных показателей тяговой характеристики) реальным результатам. Относительная погрешность сравниальной оценки производительности БА по разработанному расчетному методу не превышает 2,3%. Оценка абсолютной величины производительности по расчету занижает ее реальное значение на 9,4...12,5%. Для сравнения, расчеты по моделям, не учитывающим наличие вертикальных усилий, дают завышенную (более, чем на 100%) оценку абсолютной производительности БА.

Таблица 2

Агрегат и тип МТУ	Производительность				Погрешность сравниальной оценки П при расчете %	Погрешность абсолютной оценки П при расчете %		
	фактическая		расчетная					
	м <sup>3</sup> /ч	%	м <sup>3</sup> /ч	%				
Б170М.03-51В, ДПМ+МСТ (D=1,6)	144,4	126,8	126,4	124,9	-1,9	-12,5		
Б170М.03-51В, ДПМ+МСТ (D=1,24)	131,9	115,8	119,5	118,1	2,3	-9,4		
Б170М.03В, дизель+МСТ	113,9	100	101,2	100	-	-11,2		

В четвертой главе на базе теоретических и экспериментальных исследований разработаны методы экспериментальной оценки эффективности промышленных тракторов и соответствующее испытательное оборудование: модели нагрузения, методы и установка для тягово-динамических испытаний для оценки эффективности по ЭП; методические основы ускоренных стендовых лабораторно-полигонных испытаний, позволяющих проводить ком-

плексную оценку эффективности промышленного трактора и его основных систем.

Для достоверного воспроизведения  $\eta_d(t)$  при тягово-динамических испытаниях разработанные имитационные модели включают: реальные линейные тренды  $\Phi_{ирд}(t)$  тягового сопротивления по (23); линейные тренды  $\Phi_{вт}[(\Phi_{ирд}(t), \Phi_v(\Phi_{ирд}))]$  вертикального усилия, полученные из трендов тягового сопротивления и средних линий регрессии по (3); наложенные на тренды центрированные колебания  $\Phi_{ирд}(t)$  и  $\Phi_v(t)$  в виде гармонических функций с реальными средними частотами управления; импульсный отбор мощности на гидропривод  $\Delta N_{пп}$  по (26) и совмещение с ним импульсное воздействие положительными вертикальными усилиями, моделирующие манипуляции принудительного выглубления.

Разработанный метод тягово-динамических испытаний включает:

- имитацию нагружения на стадии копания с записью за время  $\bar{T}_k$  по (23) текущих  $X_d(t), \dot{X}_d(t), \Phi_{ирд}(t)$  и расчет значения средней призмы

$$\bar{q} = 1/k e^{-\mu \gamma / k \bar{T}_k} \int_{\bar{T}_k}^{\infty} \eta_d(X_d) e^{-\mu \gamma / k X_d} dt;$$

- раздельную оценку скоростных режимов при имитации стационарного нагружения при транспортировании в траншее и на кавальере:

$\bar{X}_{тр}^{ст}$  при  $\Phi_{тр}^{ст} = \mu \delta \bar{q}$  и  $\Phi_v^{ст} = -0,11$ ,

$\bar{X}_{тр}^{кав}$  при  $\Phi_{тр}^{кав} = \Phi_{тр}^{ст} (1 + \Phi_v^{кав}) / (1 + \Phi_v^{ст}) = 1,236 \Phi_{тр}^{ст}$  и  $\Phi_v^{кав} = 0,1$ ;

- расчет среднего времени цикла по результатам имитационных опытов:

$$T_c = \bar{T}_k + (L - \bar{L}_k) / [2\bar{X}_{тр}^{ст}] + L_{кав}/\bar{X}_{тр}^{кав} + T_{ост} + T_{хх}, \text{ где } L = 40 \text{ м}, L_{кав} = 20 \text{ м};$$

- оценку ЭП =  $3600 \bar{q} / \bar{T}_c$ .

Метод допускает индивидуальную и сравнительную (с аналогом) оценку ЭП. Разработаны методы приведения результатов оценки ЭП аналогов к одной призме (емкости отвала).

Для проведения тягово-динамических испытаний разработана установка, которая содержит устанавливаемую вместо отвала тележку, перекатываемую трактором. Тележка соединена с динамометрической лабораторией, создающей тяговое сопротивление. Для обеспечения достоверного воспроизведения вертикальных усилий и отбора мощности на гидропривод установка имеет электрогидравлический привод с двумя гидроусилителями УЭГС-500, подключенными к полостям гидроцилиндров трактора, и клапан М-ЛКПД с пропорциональным управлением, подключенным к одной из секций распределителя трактора. Элементы установки управляются от программируемого контроллера "Ремиконт Р-130". Испытания с применением установки могут проводиться на обычном грунтовом тяговом треке.

При разработке стенда для лабораторно-полигонных испытаний решалась задача ускорения испытаний, регламентированных ГОСТ 25836, и обеспечения их проведения в едином инженерном комплексе. Стенд расположен в здании, с примыкающим к нему коротким (120м) крытым грунтовым треком. Он позволяет оценить 35 показателей испытываемого трактора и проводить

тормозные испытания двигателя, тормозные испытания МТУ через ведущие колеса, тяговые испытания(в т.ч. с переменным сцепным весом), оценку ЭП с использованием одной тормозной установки на базе электродинамометра САК-Н670 и порошкового тормоза ПТ-250М. Конструкция стенда предполагает применение новых методов испытаний, в частности ускоренных тяговых испытаний с бесступенчатым нагружением (постоянным замедлением  $\alpha$ ) трактора от трансмиссии стендса через трос и учетом возникающих при этом сил инерции:

$$P_{kr} = P_{kr} + M_{pr} \cdot a,$$

где  $P_{kr}$  - тяговое усилие, измеренное на тензозвене,

$a = \dot{X}_{xx}^2 / L_t$ , здесь  $\dot{X}_{xx}$ ,  $L_t$  - скорость холостого хода трактора, рабочая длина трека,

$$M_{pr} = m_t + (J_{pr} + J_{xc}) / [R_{kk}(1-\delta)]^2 - \text{приведенная масса трактора},$$

здесь  $m_t$  - масса трактора,

$R_{kk}$  - радиус ведущего колеса,

$J_{pr}$  - момент инерции вращающихся частей трансмиссии и двигателя, приведенный к ведущим колесам (определяется при торможении МТУ с постоянным замедлением  $\epsilon = a/R_{kk}$ ),

$J_{xc} = R_{kk}^2 [(P_{fd} - P_{fet}) / a - m_t]$  - момент инерции вращающихся элементов ходовой системы (определяется на треке путем буксировки трактора с отключенной от трансмиссии ходовой системой с ускорением  $a$  и с постоянной скоростью), здесь  $P_{fd}, P_{fet}$  - усилия сопротивления передвижению с ускорением и с постоянной скоростью, соответственно.

Разработанное испытательное оборудование защищено тремя А.С.ССР, патентом РФ и внедряется в практику испытаний в ОАО "ЧТЗ".

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Методы оценки и анализа базового критерия эффективности промышленного трактора - производительности - должны учитывать наличие и закономерности вертикальных усилий, действующих на БА. Последние определяют оптимальность нестационарных рабочих процессов БА и конечную оптимизацию показателей тяговой характеристики БА и базового трактора.

2. С учетом найденных закономерностей действия вертикальных усилий на стадияхкопания и транспортирования оценены показатели "динамических" тяговых характеристик БА на данных стадиях для грунтов различной плотности. Разработаны метод и универсальные правила расчета показателей "динамических" тяговых характеристик БА при различном сцепном весе, позволяющие установить соотношения тяговых характеристик на стадиях копания и транспортирования. Уточнены математические модели процессов копания и транспортирования для грунтов различной плотности.

3. Разработан метод теоретической оценки максимальной производительности БА на основе поиска оптимальных рабочих процессов при взаимоувязке процессов копания и транспортирования и с учетом различных соответствующих "динамических" тяговых характеристик. Уточнены основные положения теории оптимальных рабочих процессов БА, теоретически

обоснована оптимальность нестационарных процессов копания, обеспечивающих максимальную производительность БА. Изучение свойств и параметров этих процессов позволили установить оптимальные показатели тяговых характеристик БА и базового трактора с различными типами МТУ, по которым даны практические рекомендации. Погрешность разработанного метода при сравнительной оценке производительности БА не превышает 2,3%.

4. Экспериментально изучены и уточнены факторы нагружения БА, связанные с системой управления рабочим органом (вариации тягового сопротивления и вертикального усилия, отбор мощности двигателя на манипуляции рабочим органом), оценено их влияние на выбор оптимальных показателей тяговой характеристики и даны соответствующие практические рекомендации. Показано, что потребный отбор мощности двигателя целесообразно принимать и учитывать в величине удельной мощности БА по значению отбора, развиваемого при манипуляциях принудительного выглубления.

5. Оценки эффективности промышленного трактора по критерию МПП в его классическом представлении и по критерию производительности не совпадают. Теоретически обосновано условие непротиворечивости энергетического критерия и критерия производительности - позиционное представление тяговой мощности на стадии копания. Данное условие не дает прямого соответствия энергетического критерия критерию производительности без заданного закона копания (процесса набора призмы грунта). В связи с чем, критерий производительности остается единственным целесообразным при теоретической оценке эффективности промышленных тракторов.

6. Разработанный для экспериментальных исследований и испытаний промышленных тракторов критерий ЭП соответствует критерию производительности и позволяет оценивать эффективность БА и базового трактора без испытаний на техническую производительность или при минимальном их объеме. При учете основных особенностей тяговой динамики разработаны методы экспериментальной оценки эффективности промышленного трактора и его систем (модели и методы тягово-динамических испытаний, методические основы ускоренных стендовых лабораторно-полигонных испытаний) и соответствующее испытательное оборудование.

7. Экспериментально изучены рабочие процессы БА на грунтах различной плотности с корректной оценкой вида процессов (тестированием тяговых сопротивлений и вертикальных усилий, действующих на БА, на стационарность) и раздельным анализом нагруженности БА на стадиях копания и транспортирования. Установлена нестационарность реальных процессов копания, проведено выделение и оценка параметров временных трендов и оценка статистических характеристик колебаний усилий, центрированных относительно трендов. Показана взаимосвязь центрированных колебаний тягового сопротивления и вертикального усилия, обусловленная последовательным циклическим процессом управления БА на стадии копания с циклом управления "вывешивание - непосредственное копание - принудительное выглубление - промежуточное копание".

8. БА является машиной с переменным управляемым сцепным весом. Изучены закономерности изменения вертикального усилия, действующего на БА

на стадии копания, как суммы реакции грунта на управляющее весовое усилие БА и вертикальной составляющей сопротивления копанию. Установлена вероятностная взаимосвязь вертикального усилия с тяговыми сопротивлениями при копании грунтов различной плотности в виде линейных регрессионных полей управления  $\{\Phi_{\text{в}}(\Phi_{\text{кpd}})\}$  со средними линиями  $\Phi_{\text{в}}(\Phi_{\text{кpd}})$ , "вокруг" которых осуществляется копание и изменяется сцепной вес БА. Характер зависимостей  $\Phi_{\text{в}}(\Phi_{\text{кpd}})$  показывает, что при копании грунтов II и III категории средний сцепной вес БА существенно снижается, но не остается постоянным (постепенно возрастает по мере роста  $\Phi_{\text{кpd}}$  и набора призмы). Вертикальное усилие при транспортировании в траншее стационарно и определяется тем, что бульдозер либо опускается (грунты II и III кат.), либо не опускается (I кат.) на грунт, а его вес, соответственно, не участвует и участвует в тягообразовании.

9. Полученные эмпирические закономерности горизонтальной и вертикальной составляющих сопротивления копанию и изученная динамика тягового сопротивления при действии напорных давлений на режущей кромке ножа бульдозера позволили установить величины давлений, потребные для эффективной работы БА на грунтах различной плотности, а максимальное весовое напорное усилие БА - квалифицировать, как один из его базовых показателей.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Костюченко В.И. Обоснование метода ускоренных лабораторно-полигонных испытаний промышленных тракторов класса 10, 15 // Совершенствование тракторных конструкций и узлов: Тез. докл. всесоюзной научно-технической конференции.- М.: НПО НАТИ, 1989.-С.59-60.
2. Пинигин Б.Н., Костюченко В.И. Стенд для ускоренных лабораторно-полигонных испытаний промышленных тракторов класса 10, 15 // Проблемы совершенствования гусеничных ходовых систем: Тез. докл. всесоюзной научно-технической конференции.- Челябинск: ЧФ НАТИ, ЧПИ, 1989.-С.107 .
3. Пинигин Б.Н., Казанцев С.В., Костюченко В.И. Оценка тягово-динамических качеств мобильных машин при испытаниях // Динамика и прочность мобильных машин: Тез. докл. научно-технической конференции.- Кутаиси: КПИ, 1990.-С.30-31.
4. Костюченко В.И., Пинигин Б.Н., Казанцев С.В. Снижение используемых земельных площадей при ускоренных лабораторно-полигонных испытаниях промышленных тракторов // Решение экологических проблем при создании и эксплуатации автомобильной и тракторной техники: Тез. докл. научно-технической конференции.- Челябинск: ЧФ НАТИ, ЧПИ, 1990.-С.58-59.
5. Костюченко В.И., Пинигин Б.Н., Казанцев С.В. Метод и установка для тягово-динамических испытаний промышленных тракторов // Методы ускоренных стендовых испытаний агрегатов тракторов и сельскохозяйственных машин на надежность: Тез. докл. всесоюзной научно-технической конференции.- Челябинск: ЧФ НАТИ, 1991.-С.45-47.

6. Костюченко В.И., Пинигин Б.Н. Автоматизация тягово-динамических испытаний промышленного трактора // Новые информационные технологии и учебная техника: Тез. докл. всесоюзной научно-методической конференции.- Челябинск: ЧПИ, 1995.-С.100-101.
7. Костюченко В.И., Пинигин Б.Н. Информационная система имитации бульдозерных нагрузок при лабораторных исследованиях промышленных тракторов // Новые информационные технологии в исследовании дискретных структур: Тез. докл. всероссийской научно-технической конференции.- Екатеринбург: ИМ УО РАН, 1996.-С.120-121.
8. Костюченко В.И., Пинигин Б.Н. Эффективность работы промышленного трактора, критерии и информационная система ее экспериментальной оценки // Новые информационные технологии и их аппаратно-методическое обеспечение: Сб. научных трудов.- Челябинск: ЧГТУ, 1997.-С.108-114.
9. Костюченко В.И., Пинигин Б.Н. Нагруженность промышленных тракторов как нестационарный случайный процесс // Исследование силовых установок и шасси транспортных машин: Сб. научных трудов.- Челябинск: ЮУрГУ, 1998.-С.93-97.
10. Пинигин Б.Н., Костюченко В.И. Вопросы ускорения тяговых испытаний промышленных тракторов // Исследование силовых установок и шасси транспортных машин: Сб. научных трудов.- Челябинск: ЮУрГУ, 1998.-С.67-73.
11. А.С. СССР N1368692 Устройство для тяговых испытаний гусеничных транспортных средств / Пинигин Б.Н., Костюченко В.И., Часоводов Н.А., Федоров В.В., Усов А.В./, 1988, Бюл. N3.
12. А.С. СССР N1647335 Установка для тягово-динамических испытаний промышленных тракторов / Пинигин Б.Н., Костюченко В.И., Казанцев С.В., Сударчиков В.А., Часоводов Н.А., Федоров В.В., Кухарев А.Ф./, 1991, Бюл. N17.
13. А.С. СССР N1742665 Установка для испытаний промышленного трактора /Баловнев В.И., Пинигин Б.Н., Костюченко В.И., Гойдо М.Е., Казанцев С.В./,1992, Бюл. N23 .
14. П. РФ N2066406 Электрогидравлический привод / Гойдо М.Е., Пинигин Б.Н., Казанцев С.В., Костюченко В.И., Ревило С.А./, 1996, Бюл. N25 .