

**brМосковский автомобильно-дорожный институт
(государственный технический
университет)**

В.И. Баловнев

**Определение оптимальных параметров и
выбор землеройных машин в зависимости
от условий эксплуатации**

Учебное пособие

Москва 2010

УДК 625.76.08
ББК 39.311-06-5
Б 38

Б 38 Баловнев, В.И. Определение оптимальных параметров и выбор землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации: учеб. пособие / В.И. Баловнев; МАДИ (ГТУ). – М., 2010. – 134 с.

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. А.Г. Савельев, МАДИ (ГТУ);
канд. техн. наук А.В. Жаворонков, ОАО «ВНИИстройдормаш».

В учебном пособии приведены зависимости для определения параметров и материалы по методике выбора машин и определения их главных параметров на основании метода минимизации времени рабочего цикла и обобщения оптимальных решений на системы землеройных машин. Приведена система расчетных формул и примеры определения параметров и выбора машин в зависимости от условий эксплуатации.

Учебное пособие предназначается для студентов вузов, обучающихся по специальностям 170900 «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование», 653200 «Транспортные машины и транспортно-технологические комплексы», 230100.03 «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования», 653300 «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования».

ISBN 5-7962-0083-6

УДК 625.76.08
ББК 39.311-06-5

© В.И. Баловнев, 2010
© Московский автомобильно-дорожный институт
(государственный технический университет), 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Земляные работы — важная часть строительного производства. Эффективность земляных работ в значительной степени определяется широтой использования инновационных технологий и техники. Совершенствование землеройной техники связано с реализацией перспективных тенденций развития машиностроения: компьютеризации, интеллектуализации, эргономизации, экологизации, повышения ресурса техники, обеспечения высокого уровня сервиса и др.

Существенным резервом интенсификации земляных работ является оптимизация параметров машин и эффективное использование техники. Машин соответствующего типоразмера должны использоваться в тех условиях, в которых они дают наибольший результат.

В учебном пособии рассмотрена методика определения оптимальных технико-эксплуатационных параметров и выбора землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации. Расчет основан на методе минимизации математической модели продолжительности рабочего цикла машины, разработанном в МАДИ (ГТУ). Приведены методы определения исходных оптимальных технико-эксплуатационных параметров землеройных машин: массы m , энергонасыщенности N/m , минимального значения времени рабочего цикла машины $t_{ц, min}$, максимальной производительности Π , вместимости ковша q , мощности привода N и др.

На этапе проектирования методика используется при формировании технического задания. Полученная информация является исходной при выполнении тяговых расчетов, определения устойчивости, расчетов на прочность и технико-экономическом анализе и уточняется при необходимости.

На этапе эксплуатации установленные оптимальные технико-эксплуатационные параметры используются для выбора наиболее эффективной машины.

Для удобства читателей материал учебного пособия разделен на две главы.

Глава 1 содержит расчетные зависимости и примеры практических расчетов на основании приведенных формул.

Глава 2 включает в себя научно-теоретические основы метода определения оптимальных технико-эксплуатационных параметров и выбора землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации.

Параграф 1.1 и компьютерное оформление рукописи выполнены канд. техн. наук Р.Г. Даниловым.

Замечания читателей будут приняты с благодарностью.

Глава 1. СИСТЕМА ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ВЫБОРА ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН

1.1. Общие сведения о технических характеристиках и параметрах землеройных машин

Рабочий процесс землеройных машин состоит из ряда выполняемых последовательно операций: отделения грунта от массива и его захвата, перемещения, укладки в сооружение или отвал и возвращение в исходное положение. Укладка грунта сопровождается его уплотнением. Многообразие условий производства земляных работ приводит к созданию большого количества типов этих машин с различными параметрами.

Техническая характеристика машины – это документ, содержащий информацию о технических, эксплуатационных, эргономических и экологических параметрах машины, обеспечивающих возможность принятия решения об эффективном использовании машины для выполнения требуемых технологических операций в зависимости от условий эксплуатации.

Параметрами машины называются единицы информации или величины, характеризующие конкретные технико-эксплуатационные и экологические возможности машины при выполнении соответствующих технологических операций.

Для землеройных машин различают главные, основные и вспомогательные параметры.

Главными параметрами называют параметры, которые в наибольшей степени определяют технологические возможности машин. Это в первую очередь: масса машин m , мощность силовой установки N (или суммарная мощность основных двигателей при электроприводе), и др. У экскаваторов, скреперов к главным параметрам относят также вместимость ковша q , а у фронтальных погрузчиков – грузоподъемность Q .

Основными параметрами называют параметры, которые необходимы для выбора машины при определенных условиях ее эксплуатации. **Основные параметры** включают в себя **главные параметры, параметры, определяющие проходимость и маневренность, усилия на рабочем органе, основные рабочие размеры машин, а также их надежность.** Маневренность и проходимость машин в первую очередь характеризуются их давлением на грунт в рабочих и транспортных режимах, преодолеваемым углом подъема машины, скоростями передвижения и наименьшим радиусом поворота. Геометрическими размерами, определяющими проходимость и маневренность, являются габаритные размеры в транспортном положении, колея, база, дорожный просвет,

углы въезда и съезда. Рабочие размеры одноковшовых экскаваторов и роторных карьерных экскаваторов непрерывного действия характеризуются радиусами и высотой (или глубиной) копания, радиусом и высотой выгрузки; траншейных экскаваторов непрерывного действия – глубиной и шириной разрабатываемой траншеи; бульдозеров и автогрейдеров – шириной и высотой отвалов. К основным параметрам также относятся эргономические и экологические характеристики машин, обеспечивающие возможность использования машины в том или ином регионе (требования чистоты вредных выбросов двигателя, шахтное исполнение, требования безопасности для работы оператора).

Вспомогательными параметрами называют параметры, характеризующие условия технического обслуживания, ремонта, перебазирования, сервиса и др.

Главные параметры землеройных машин определяются государственными стандартами (с 2010 г. государственными техническими регламентами).

ГОСТ 30067–93 на одноковшовые универсальные полноповоротные экскаваторы в качестве главного параметра экскаватора определяет массу машины. Это оправдано тем, что одноковшовые экскаваторы являются универсальными машинами и оснащаются сменными рабочими органами – ковшами различной вместимости и назначения (узкие, планировочные и др.), рыхлителями и гидравлическим инструментом различного назначения (гидромолотами, виброплитами и др.).

Бульдозерное и рыхлительное оборудование, устанавливаемое на промышленные тракторы, в качестве главного параметра, регламентируемого положениями ГОСТ 27434–87, имеет номинальное тяговое усилие, практически массу машины. Тракторы (гусеничные и колесные) являются базой для многих видов навесных и прицепных машин для земляных работ (экскаваторов, бульдозеров, рыхлителей, кусторезов, скреперов, бурильных, уплотняющих и других машин). Тракторы выпускают в широком диапазоне типоразмеров: массой от 0,5...1 до 60...70 т и мощностью от 4...6 до 800 кВт. Тяговое усилие для гусеничных тракторов определяется при скорости 2,6...3,0 км/ч, для колесных – 3,0...3,5 км/ч. По тяговому усилию сельскохозяйственные тракторы по ГОСТ 19677–87 подразделяются на тяговые классы 0,6; 0,9; 1,4; 2; 3; 5; 6 даН, промышленные тракторы по ГОСТ 37434–87 имеют классы: 3, 4, 6, 10, 15, 25, 35, 50 и 75 даН. Сила тяги на крюке гусеничных тракторов примерно равна их весу, а у колесных тракторов составляет от 0,5 до 0,6 от веса. Промышленные тракторы служат базой для навесных и прицепных землеройных машин. Пневмоколесные (одноосные и двухосные) тягачи являются базовыми для различных землеройных (скреперов, погрузчиков, колесных бульдозеров) и транспортных (землевозов, думперов) машин. Тягачи агрегатируются

гидромеханической или гидрообъемной трансмиссией, обеспечивающей высокую транспортную скорость до 40...50 км/ч и плавно регулируемую до нуля рабочую скорость. Они обладают хорошей маневренностью и высокой проходимостью, для чего оснащаются пневматическими шинами с регулируемым давлением.

Скреперы агрегируемые на пневмоколесном и тракторном шасси согласно ГОСТ 30035–93 имеют в качестве главного технического параметра вместимость ковша.

Главным техническим параметром одноковшовых погрузчиков на пневмоколесном и тракторном шасси согласно ГОСТ Р 51601–2000 и телескопических погрузчиков по ГОСТ Р 50950–96 является грузоподъемность.

Автогрейдеры всех типов по ГОСТ 11030–93 в качестве главного параметра имеют эксплуатационную мощность. По главному параметру автогрейдеры подразделяются на четыре класса: 100 (66...88 кВт), 140 (88,9...117,6 кВт), 180 (118...147 кВт) и 250 (свыше 147 кВт). Автогрейдеры используются для выполнения планировочных и профилировочных работ и оснащаются различным сменным рабочим оборудованием.

Автомобили как дорожные, предназначенные для работы на дорогах общего пользования, так и внедорожные, по своим габаритным размерам и осевым нагрузкам не предназначенные для эксплуатации на дорогах общего пользования, широко используются в качестве базовых для землеройных (экскаваторы, экскаваторы-планировщики) и технологических (буровые, бурильно-крановые, вспомогательные) машин. При комплектовании парков машин для выполнения земляных работ в качестве транспортных машин широко используются автомобили-самосвалы, которыми транспортируют грунт от выемки к насыпи или отвалу. Специальные автомобили-трейлеры и тягачи с прицепами и полуприцепами тяжеловозами используются для перебазировки землеройных машин между объектами строительства.

Автомобили согласно ГОСТ Р 52051–2003 различают по главному параметру – полной массе. Автомобили, предназначенные для перевозки грузов, подразделяются на три категории: N_1 – полной массой до 3,5 т, N_2 – полной массой до 12 т и N_3 – полной массой свыше 12 т. Грузоподъемность грузовых автомобилей выпускаемых промышленностью находится в пределах от 0,8 до 300 т. Скорость движения землеройных машин на шасси автомобилей достигает 60...70 км/ч, автомобилей-самосвалов – до 100 км/ч.

Землеройные машины являются сложными технологическими машинами. Они состоят из силового оборудования (двигателей), трансмиссии (передаточных и преобразующих механизмов, изменяющих как направление и скорость вращения исполнительных механиз-

мов, так и преобразующих один вид энергии в другой), рабочего оборудования, ходового оборудования, системы управления и несущих конструкций, которые воспринимают нагрузки от двигателя, элементов трансмиссии. Основные функциональные части машин комплектуют из унифицированных узлов и агрегатов. Унифицированные узлы и агрегаты имеют стандартные заводские сертификаты. Применение унифицированных узлов и агрегатов повышает качество машины в целом и обеспечивает расширение номенклатуры производства.

Выбор параметров новых машин при их создании является важной технико-экономической задачей. Решение этой задачи обеспечивает создание систем и комплектов машин для обеспечения эффективной комплексной механизации производства земляных работ.

В качестве целевой функции при оптимизации параметров используют технико-эксплуатационные показатели, включая время рабочего цикла и показатели технико-экономической эффективности.

Анализ рабочих процессов землеройных машин с ковшовыми и отвальными рабочими органами и соответствующих ГОСТов позволяет сделать вывод, что для одноковшовых экскаваторов главным техническим параметром является масса машины. Для бульдозерно-рыхлительных агрегатов, созданных на базе промышленных тракторов, главным параметром считается тяговое усилие зависящее от массы. Скреперы в качестве главного технического параметра имеют вместимость ковша. Для автогрейдеров главным техническим параметром является мощность двигателя, для погрузчиков – грузоподъемность. Остальные основные технические параметры являются производными от главного и могут быть определены методами моделирования и теории подобия для подобных объектов техники.

1.2. Зависимости для определения оптимальных параметров землеройных машин. Примеры расчета параметров

В гл. 1.2 приведены зависимости для определения главных и основных параметров землеройных машин: массы, энергонасыщенности, мощности двигателя, вместимости рабочего органа и его размеров, производительности и др. Расчетные формулы получены на основании метода минимизации продолжительности рабочего цикла машины, см. гл. 2. Землеройные машины с установленными по приведенным формулам параметрами обеспечивают в условиях эксплуатации, для которых рассчитаны параметры, высокую технико-эксплуатационную эффективность работы по показателям: максимальной производительности, минимальным удельным энергоемкости, материалоемкости и обобщенному показателю энерго- и материалоемкости Π_{Nm} .

Приведенные в учебном пособии зависимости позволяют установить исходные параметры машины с достаточной для предваритель-

ных расчетов достоверностью. На этапе проектирования зависимости могут быть использованы для определения исходных параметров и последующих традиционных расчетов. На этапе эксплуатации зависимости обеспечивают обоснованный выбор наиболее эффективных для заданных условий работы образцов техники.

Величины удельных сопротивлений копанью грунтов различной категории прочности рабочими органами существующих машин, необходимые для расчетов, приведены в табл. 1.1.

Обозначения и величины безразмерных и размерных коэффициентов, принятые в формулах, которые входят в расчетные зависимости, приведены в табл.1.2. Обозначения, которые используются в приведенных формулах, рассмотрены также в гл. 2 и табл. 3.1, 3.2.

Все расчеты выполняются в размерности СИ (кг, м, с, Н).

Таблица 1.1

Значения удельного сопротивления копанью $k_{y\partial}$ землеройных машин в зависимости от категории трудности разработки грунта, Н/м² (МПа)

Категория грунта	Число ударов плотномера ДорНИИ	Плотность γ , кг/м ³	Удельное сопротивление копанью $k_{y\partial}$, Н/м ² (МПа)					
			Экскаватор обратная лопата	Бульдозер	Рыхлитель	Скрепер	Автогрейдер	Ковшовый погрузчик
I	1–4	1200... 1500	80000 (0,08)	120000 (0,12)	—	120000 (0,12)	80000 (0,08)	120000 (0,12)
II	5–8	1400... 1900	180000 (0,18)	200000 (0,2)	—	180000 (0,18)	160000 (0,16)	200000 (0,2)
III	9–16	1600... 2000	280000 (0,28)	300000 (0,3)	—	200000 (0,2)	250000 (0,25)	300000 (0,3)
IV	17–35	1900... 2200	450000 (0,45)	600000 (0,6)	500000 (0,5)	—	—	—
V	36–70	2200... 2500	650000 (0,65)	—	700000 (0,7)	—	—	—
VI	71–120	2200... 2600	950000 (0,95)	—	—	—	—	—
VII	135–370	2300... 2600	4000000 (4,0)	—	—	—	—	—
VIII хорошо взорванная горная порода	Более 370	2500... 2800	250000 (0,25)	—	—	—	—	—

Таблица 1.2

Значения величин параметров и коэффициентов, необходимых для определения технико-эксплуатационных параметров землеройных машин с ковшовым рабочим органом

Вид землеройной техники	Значения влияющих величин												
	$k_{y\partial}^*$	$V, \text{ м/с}$	$l, \text{ м}$	$k_{m \text{ опп}}$	k_{Γ}	$k_{Эн}$	$k_{t\text{min}}$	$k_2, \text{ Вт/кг}$	$k_3, \text{ Вт/м}^3$	$k_{13}, \text{ м}^3/\text{Вт}$	$k_{15}, \text{ м}^3/\text{кг}$	$k_{19}, \text{ м/кг}^{1/3}$	$k_{31}, \text{ м}^2/\text{Вт}$
Экскаватор 1-й – 3-й размерных групп	$k_{y\partial.э}$	1... 1,5	3...5	4,2	0,33	0,26	3,0	5	$1,6 \cdot 10^5$	$(0,05...0,07) \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	0,033	–
Бульдозер с лобовым отвалом	$k_{y\partial.б}$	1... 1,5	15... 40	2,6	0,5	0,35	2,0	10	–	$0,2 \cdot 10^{-4}$	–	0,12	$0,2 \cdot 10^{-5}$
Рыхлитель	$k_{y\partial.р}$	1...2	15... 40	5,5	0,3	0,2	3,0	7	–	–	–	–	$0,2 \cdot 10^{-6}$
Бульдозер-рыхлитель	$k_{y\partial.р}$	1...2	15... 40	4... 6	0,125	0,16	8	7	–	–	–	–	$(0,1...0,2) \times 10^{-6}$
Скрепер	$k_{y\partial.с}$	1... 2,5	500... 900	12	0,14	0,08	7,2	8	$1,8 \cdot 10^4$	$0,55 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	0,1	–
Автогрейдер	$k_{y\partial.а}$	1...3	500... 900	3... 4	0,4	0,25	2,44	7	–	–	–	0,15	$(0,15...0,2) \cdot 10^{-5}$
Одноковшовый погрузчик	$k_{y\partial.п}$	1...2	5...15	4,4	0,31	0,23	3,15	8	$7 \cdot 10^4$	$0,14 \cdot 10^{-4}$	$(0,1...0,2) \times 10^{-3}$	0,11	–
Экскаватор-погрузчик	$k_{y\partial.э},$ $k_{y\partial.п}$	1...2	3...10	4,4	0,31	0,23	3,14	5	$8 \cdot 10^4$	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-4}$	–	–

Примечание. Значения коэффициента удельного сопротивления грунта разрушению $k_{y\partial}$ в зависимости от вида рабочего органа землеройной машины и свойств разрабатываемого грунта приведены в табл. 1.1.

1.2.1. Одноковшовые экскаваторы 1-й – 2-й размерных групп Определение параметров по условиям эксплуатации и вместимости ковша

Оптимальная масса одноковшового экскаватора

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot q \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.э}} \cdot k_3}{g^2 \cdot v_k \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Оптимальная энергонасыщенность одноковшового экскаватора

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = k_{\text{эН}} \left(\frac{g^2 \cdot v_k \cdot l_x}{k_{\text{уд.э}} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.}$$

Мощность двигателя одноковшового экскаватора

$$N = \frac{1}{k_{m_{\text{опт}}}} \cdot m_{\text{опт}} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v_k \cdot l_x}{k_{\text{уд.э}} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт.}$$

Максимальная производительность одноковшового экскаватора

$$P_{\text{max}} = k_{\text{П}} \cdot m_{\text{опт}} \cdot \left(\frac{v_k \cdot k_2 \cdot k_{15}}{k_{\text{уд.э}} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с.}$$

Определение параметров по условиям эксплуатации и производительности машины

Оптимальная масса одноковшового экскаватора

$$m = k_{m_{\text{опт}}} \cdot \Pi \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.э}} \cdot l}{v_k \cdot k_2 k_{15}} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Оптимальная вместимость ковша экскаватора

$$q = \frac{1}{k_{\text{П}}} \cdot \Pi \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.э}} \cdot l}{v_k \cdot k_3} \right)^{1/2}, \text{ м}^3.$$

Другие параметры рассчитывают по формулам, данным выше.

Пример расчета основных технико-эксплуатационных параметров экскаваторов 1-й – 2-й размерных групп

Требуется определить параметры экскаватора по заданной вместимости ковша $q_3 = 0,3 \text{ м}^3$. Экскаватор предназначен для разработки грунтов III категории прочности.

1. Расчет оптимальной массы $m_{\text{опт}}$. Расчетная формула (3.9), см. п. 2.3.

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot q \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.э}} \cdot k_3}{g^2 \cdot v_k \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Устанавливаются значения параметров, необходимых для расчета.

$k_{m\text{ опт}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 3-й размерных групп $k_{m\text{ опт}} = 4,2$, см. табл. 1.2.

$k_{yд.э}$ – удельное сопротивление копанью ковшом экскаватора $k_{yд.э} = 200000 \text{ Н/м}^2$. см. табл. 1.1.

k_3 – размерный коэффициент подобия. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 3-й размерных групп

$$k_3 = 1,6 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3, \text{ см. табл. 1.2.}$$

v_K – скорость копания, $v_K = 1 \dots 2 \text{ м/с}$;

l_x – расстояние передвижения экскаватора по строительному участку, $l_x = 4 \dots 5 \text{ м}$, см. табл. 1.2.

Подставляют установленные величины в расчетную формулу, получают

$$m_{\text{опт}} = 4,2 \cdot 0,32 \cdot \left(\frac{200000 \cdot 1,6 \cdot 10^5}{9,81^2 \cdot 1 \cdot 4} \right)^{1/2} = 11700 \text{ [кг]}.$$

2. Расчет оптимальной энергонасыщенности экскаватора $(N/m)_{\text{опт}}$, расчетная формула (3.12), см. гл. 2.

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = k_{эН} \left(\frac{g^2 \cdot v_K \cdot l_x}{k_{yд.э} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.}$$

Устанавливаются значения величин, входящих в формулу.

$k_{эН}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 3-й размерных групп $k_{эН} = 0,26$, см. табл. 1.2.

k_{13} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^3/\text{Вт}$. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 3-й размерных групп

$$k_{13} = 0,05 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Вт}, \text{ см. табл. 1.2.}$$

Другие величины приведены ранее.

Установленные величины подставляются в расчетную формулу

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = 0,26 \frac{9,81^2 \cdot 1 \cdot 4}{200000 \cdot 0,05 \cdot 10^{-4}} = 5,1 \text{ [Вт/кг]}.$$

3. Расчет мощности двигателя экскаватора. Мощность двигателя определяется на основании установленной оптимальной массы $m_{\text{опт}}$ и формулы (3.18).

$$N = \frac{1}{k_{m\text{ опт}}} \cdot m_{\text{опт}} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v_K \cdot l_x}{k_{yд.э} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт.}$$

Устанавливаются значения величин входящих в формулу.

k_{13} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^3/\text{Вт}$.

Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 3-й размерных групп $k_{13} = (0,05 \dots 0,07) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Вт}$, см. табл. 1.2.

Значения других исходных величин приведены ранее.

Подставляются соответствующие величины в расчетную формулу, получают

$$N = \frac{1}{4,2} \cdot 11700 \cdot \left(\frac{9,81^2 \cdot 1 \cdot 4}{200000 \cdot 0,05 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/2} = 54578 \text{ [Вт]} \quad (54,578 \text{ кВт}).$$

4. Расчет максимальной производительности экскаватора для условий работы, указанных выше. Расчетная формула (3.14).

$$P_{\max} = k_{\Gamma} \cdot m_{\text{опт}} \cdot \left(\frac{v_{\kappa} \cdot k_2 \cdot k_{15}}{k_{\text{уд.э}} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Устанавливаются значения величин, входящих в формулу.

k_{Γ} – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 3-й размерных групп $k_{\Gamma} = 0,33$, см. табл. 1.2.

k_2 – размерный коэффициент подобия, Вт/кг. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 3-й размерных групп $k_2 = 5$ Вт/кг, см. табл. 1.2.

Другие величины приведены выше.

Установленные величины подставляются в расчетную формулу.

$$P_{\max} = 0,33 \cdot 11700 \cdot \left(\frac{1 \cdot 5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}}{200000 \cdot 4} \right)^{1/2} = 0,077 \text{ [м}^3/\text{с]} \quad (277,2 \text{ м}^3/\text{ч}).$$

Производительность зависит от прочности разрабатываемого грунта и холостых перемещений экскаватора по участку. Чем больше эти величины, тем меньше производительность.

1.2.2. Бульдозеры

Определение параметров по условиям эксплуатации и мощности двигателя

Оптимальная масса бульдозера

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.б}} \cdot l_{\kappa} \cdot k_{31}}{g^2 \cdot v_{\kappa} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}.$$

Оптимальная энергонасыщенность бульдозера

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = k_{\text{эН}} \left(\frac{g^2 \cdot v_{\kappa} \cdot l_x}{k_{\text{уд.б}} \cdot l_{\kappa} \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}.$$

Длина (ширина) отвала бульдозера

$$B_{\text{б}} = k_{19} \cdot \sqrt[3]{m_{\text{опт}}}, \text{ Вт}.$$

Максимальная производительность бульдозера

$$P_{\max} = k_{\Pi} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{31} \cdot v_{\kappa}}{k_{y\partial.б} \cdot 3} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определение параметров по условиям эксплуатации и производительности машины

$$m = \frac{1}{k_{\Pi}} \cdot \Pi \cdot \left(\frac{k_{y\partial.б} \cdot l_x}{v_{\kappa} \cdot l_{\kappa} \cdot k_2^2 \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ кг}.$$

Другие параметры рассчитывают по формулам данным выше.

Пример расчета основных технико-эксплуатационных параметров бульдозера

Определить технические параметры бульдозера для трактора с двигателем мощностью 170 кВт и гусеничным движителем, который предназначается для разработки грунтов IV категории прочности, $k_{y\partial.p} = 0,5 \text{ МПа}$ (500000 Н/м^2), см. табл. 1.1.

1. Расчет оптимальной массы $m_{\text{опт}}$. Расчетная формула (3.19).

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{y\partial.б} \cdot l_{\kappa} \cdot k_{31}}{g^2 \cdot v_{\kappa} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}.$$

Устанавливаются значения величин, необходимых для расчета.

$k_{m_{\text{опт}}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации; $k_{m_{\text{опт}}} = 2,3$, см. табл. 1.2;

k_{31} – размерный коэффициент подобия, $k_{31} = 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Вт}$, см. табл. 1.2;

v_{κ} – средняя скорость копания, $v_{\kappa} = 1 \text{ м/с}$ ($3,6 \text{ км/ч}$);

l_{κ} – путь копания, $l_{\kappa} = 20 \text{ м}$; далее принимается по соотношению

$$l_x \cong 3 \cdot l_{\kappa}.$$

Подставляют данные в формулу, получают

$$m_{\text{опт}} = 2,6 \cdot 170000 \cdot \left(\frac{500000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-5}}{9,81^2 \cdot 1 \cdot 3} \right)^{1/2} = 26000 \text{ [кг]}.$$

2. Расчет оптимальной энергонасыщенности бульдозера $(N/m)_{\text{опт}}$, расчетная формула (3.21), см. гл. 2.3.

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = k_{\text{ЭН}} \left(\frac{g^2 \cdot v_{\kappa} \cdot l_x}{k_{y\partial.б} \cdot l_{\kappa} \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}.$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

$k_{\text{ЭН}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для бульдозеров $k_{\text{ЭН}} = 0,35$, см. табл. 1.2.

k_{31} – размерные коэффициенты подобия, см. табл. 1.2,

$$k_{31} = 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Вт}.$$

Остальные параметры рассмотрены в гл. 2.3.

Подставляют данные величины в расчетную формулу, получают

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{\text{опт}} = 0,35 \left(\frac{9,81^2 \cdot 1 \cdot 3}{500000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-5}} \right)^{1/2} = 6,4 \text{ [Вт/кг]}.$$

В гл. 2 показано, что величина энергонасыщенности существенно зависит от скорости холостого передвижения. В приведенной выше формуле это учтено коэффициентом $k_{\text{эн}}$.

3. Расчет ширины отвала бульдозера для условий работ, рассмотренных выше. Расчетная формула (3.48)

$$B_6 = k_{19} \cdot \sqrt[3]{m_{\text{опт}}}, \text{ Вт},$$

где k_{19} – размерный коэффициент подобия, $k_{19} = 0,12 \text{ м/кг}^{1/3}$, см. табл. 1.2.

Подставляем соответствующие величины в расчетную формулу, получаем

$$B_6 = 0,12 \cdot \sqrt[3]{26000} = 3,55 \text{ [м]}.$$

4. Расчет максимальной производительности бульдозера для условий эксплуатации, указанных выше. Расчетная формула **при $l_x \cong 3 \cdot l_k$** имеет вид (3.25)

$$P_{\text{max}} = k_{\text{П}} \cdot N \cdot \left(\frac{v_k \cdot k_{31}}{k_{\text{уд.б}} \cdot 3} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

$k_{\text{П}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации, $k_{\text{П}} = 0,5$.

k_{31} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^2/\text{Вт}$. Для бульдозеров $k_{31} = 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Вт}$, см. табл. 1.2.

Значения остальных величин приведены выше.

Подставляют установленные величины в формулу, получают

$$P_{\text{max}} = 0,5 \cdot 170000 \cdot \left(\frac{1 \cdot 0,2 \cdot 10^{-5}}{500000 \cdot 3} \right)^{1/2} = 0,098 \text{ [м}^3/\text{с]} \text{ (353 м}^3/\text{ч)}.$$

1.2.3. Рыхлители

Определение параметров по условиям эксплуатации и мощности двигателя

Оптимальная масса рыхлителя

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.р}} \cdot l_p \cdot k_{31}}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}.$$

Оптимальная энергонасыщенность рыхлителя

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{\text{опт}} = k_{\text{эн}} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{\text{уд.р}} \cdot l_p \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.}$$

Максимальная производительность рыхлителя

$$P_{\text{max}} = k_{\text{п}} \cdot N \cdot \left(\frac{v_p \cdot l_p \cdot k_{31}}{k_{\text{уд.р}} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с.}$$

Определение параметров по условиям эксплуатации и производительности машины

$$m_{\text{опт}} = \frac{P}{k_{\text{п}}} \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.р}} \cdot l_x}{v_p \cdot l_p \cdot k_2^2 \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Определение других параметров рассмотрено в гл. 2.3.

Пример расчета основных технико-эксплуатационных параметров рыхлителя

Определить параметры рыхлителя установленного на гусеничном тягаче мощностью двигателя 434 кВт с тремя рыхлящими зубьями. Назначение машины – разработка грунтов V категории прочности, $k_{\text{уд.р}} = 0,7$ МПа (700000 Н/м^2), см. табл. 1.1.

1. Расчет оптимальной массы рыхлителя $m_{\text{опт}}$. Расчетная формула (3.26), см. гл. 2.3.

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.р}} \cdot l_p \cdot k_{31}}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Устанавливаются величины параметров, необходимые для расчета.

$k_{m_{\text{опт}}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для рыхлителя $k_{m_{\text{опт}}} = 5,5$, см. табл. 1.2.

k_{31} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^2/\text{Вт}$. Для рыхлителей $k_{31} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{Вт}$, табл. 1.2.

n_3 – число зубьев рыхлителя, $n_3 = 3$;

v_p – средняя скорость рыхления, $v_p = 1 \dots 2 \text{ м/с}$;

l_p – дальность передвижения рыхлителя на рабочем ходу;

l_x – дальность передвижения рыхлителя на холостом ходу.

Принимается при работе рыхлителя по челночной схеме, что дальность перемещения при рабочем и холостом ходах равна $l_p \approx l_x$.

Подставляют установленные величины в расчетную формулу, получают

$$m_{\text{опт}} = 5,5 \cdot 434000 \cdot \left(\frac{700000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}}{9,81^2 \cdot 1,5} \right)^{1/2} = 74490 \text{ [кг]}.$$

2. Расчет оптимальной энергонасыщенности рыхлителя $(N/m)_{\text{опт}}$, расчетная формула (3.28), см. гл. 2.3.

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{\text{опт}} = k_{\text{эн}} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{\text{уд.р}} \cdot l_p \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг},$$

где $k_{\text{эн}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для рыхлителей $k_{\text{эн}} = 0,2$, см. табл. 1.2.

Остальные параметры рассмотрены выше.

При $l_p \approx l_x$ получают

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{\text{опт}} = 0,2 \left(\frac{9,81^2 \cdot 1,5}{700000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{1/2} = 6,4 \text{ [Вт/кг]}.$$

3. Расчет максимальной производительности рыхлителя для условий эксплуатации, указанных выше. Расчетная формула (3.32).

$$P_{\text{max}} = k_{\text{п}} \cdot N \cdot \left(\frac{v_p \cdot l_p \cdot k_{31}}{k_{\text{уд.р}} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

$k_{\text{п}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации, $k_{\text{п}} = 0,3$, см. табл. 1.2.

k_{31} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^2/\text{Вт}$. Для рыхлителей $k_{31} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{Вт}$, см. табл. 1.2.

Значения остальных величин приведены выше.

Подставляют установленные величины в формулу, при $l_p \approx l_x$ получают

$$P_{\text{max}} = 0,3 \cdot 434000 \cdot \left(\frac{0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5}{700000} \right)^{1/2} = 0,08 \text{ [м}^3/\text{с]} \text{ (300 м}^3/\text{ч)}.$$

1.2.4. Бульдозеры-рыхлители

Определение параметров по условиям эксплуатации и мощности двигателя бульдозера-рыхлителя

Оптимальная масса бульдозера-рыхлителя

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.р}} \cdot l_p \cdot k_{31}}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}.$$

Оптимальная энергонасыщенность бульдозера-рыхлителя

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{\text{опт}} = k_{\text{эн}} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_{x6}}{k_{\text{уд.р}} \cdot l_p \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}.$$

Максимальная производительность бульдозера-рыхлителя

$$P_{\max} = k_{\Pi} \cdot N \cdot \left(\frac{v_p \cdot l_p \cdot k_{31}}{k_{yд.р} \cdot l_{хб}} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определение параметров по условиям эксплуатации и производительности бульдозера-рыхлителя

$$m = \frac{\Pi}{k_{\Pi}} \cdot \left(\frac{k_{yд.р} \cdot l_x}{v_p \cdot l_p \cdot k_2^2 \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ кг}.$$

Определение других параметров рассмотрено в гл. 2.3.

Пример расчета основных технико-эксплуатационных параметров бульдозера-рыхлителя

Определить технические параметры бульдозера-рыхлителя по заданной мощности двигателя 434 кВт установленного на гусеничном тракторе и предназначенного для разработки грунтов V категории прочности, $k_{yд.р} = 0,7$ МПа (700000 Н/м^2), см. табл. 1.1.

1. Расчет оптимальной массы $m_{\text{опт}}$. Расчетная формула (3.33), см. гл. 2.3.

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{yд.р} \cdot l_p \cdot k_{31}}{g^2 \cdot v_p \cdot l_{хб}} \right)^{1/2}, \text{ кг}.$$

Устанавливаются величины параметров, необходимые для расчета.

$k_{m_{\text{опт}}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации, для бульдозера-рыхлителя $k_{m_{\text{опт}}} = 6$, см. табл. 1.2;

v_p – средняя скорость рыхления, $v_p = 1 \dots 2$ м/с;

l_p – дальность передвижения агрегата на рабочем ходу;

l_x – дальность передвижения агрегата на холостом ходу.

Принимаем по условиям работы бульдозера-рыхлителя челночную схему, когда дальность перемещения при рабочем и холостом ходах равна $l_p \approx l_x$.

Подставляют установленные величины в расчетную формулу, при $l_p \approx l_x$ получают

$$m_{\text{опт}} = 6 \cdot 434000 \cdot \left(\frac{700000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}}{9,81^2 \cdot 1,5} \right)^{1/2} = 86900 \text{ [кг]}.$$

2. Расчет оптимальной энергонасыщенности бульдозера-рыхлителя $(N/m)_{\text{опт}}$, расчетная формула (3.35).

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = k_{\text{ЭН}} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_{хб}}{k_{yд.р} \cdot l_p \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}.$$

Устанавливают величины параметров, входящие в формулу

$k_{эН}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для рыхлителей $k_{эН} = 0,16$, см. табл. 1.2.

Остальные параметры рассмотрены выше.

Подставляют данные величины в расчетную формулу, при $l_p \approx l_x$ получают

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{опт} = 0,16 \left(\frac{9,81^2 \cdot 1,5}{700000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{1/2} = 5,1 \text{ [Вт/кг]}.$$

3. Расчет максимальной производительности бульдозера-рыхлителя для заданных условий эксплуатации. Расчетная формула (3.39).

$$P_{max} = k_{П} \cdot N \cdot \left(\frac{v_p \cdot l_p \cdot k_{31}}{k_{уд.p} \cdot l_{хб}} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Устанавливаются значения величин, входящих в формулу.

$k_{П}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации, $k_{П} = 0,125$, см. табл. 1.2.

k_{31} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^2/\text{кг}$. Для бульдозеров-рыхлителей $k_{31} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{Вт}$, см. табл. 1.2.

Значения остальных величин приведены выше.

Подставляют установленные величины в формулу, при $l_p \approx l_x$ получают

$$P_{max} = 0,125 \cdot 434000 \cdot \left(\frac{0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5}{700000} \right)^{1/2} = 0,035 \text{ [м}^3/\text{с]} \text{ (126 м}^3/\text{ч)}.$$

Бульдозер с рыхлительным оборудованием выполняет рабочие операции, состоящие из операций рыхления рыхлителем и перемещения разрыхленного грунта отвалом бульдозера. Производительность агрегата при выполнении этих двух операций в любой технологической последовательности будет несколько меньшей, чем производительность специальных отдельных машин. Однако выработка на одного рабочего будет значительно большей.

1.2.5. Скреперы

Определение параметров по условиям эксплуатации и вместимости ковша

Оптимальная масса скрепера

$$m_{опт} = k_{m_{опт}} \cdot q \cdot \left(\frac{k_{уд.c} \cdot k_3}{g^2 \cdot v_k \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}.$$

Оптимальная энергонасыщенность скрепера

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{опт} = k_{эН} \left(\frac{g^2 \cdot v_k \cdot l_x}{k_{уд.c} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}.$$

Мощность двигателя скрепера

$$N = \frac{1}{k_{m_{опт}}} \cdot m_{опт} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v_k \cdot l_x}{k_{yд.с} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт.}$$

Максимальная производительность скрепера

$$П_{max} = k_{п} \cdot m \cdot \left(\frac{v_k \cdot k_2 \cdot k_{15}}{k_{yд.с} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с.}$$

Вместимость ковша скрепера

$$q_{п} = k_{15} \cdot m_{опт}, \text{ Вт.}$$

Ширина ковша скрепера

$$b_k = k_{19} \cdot \sqrt[3]{m_{опт}}, \text{ м.}$$

Определение параметров по условиям эксплуатации и производительности скрепера

Оптимальная масса скрепера

$$m = k_{t_{min}} \cdot П \cdot \left(\frac{k_{yд} \cdot l}{v \cdot k_2 k_{15}} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Оптимальная вместимость ковша скрепера

$$q = \frac{1}{k_{п}} \cdot П \cdot \left(\frac{k_{yд} \cdot l}{v \cdot k_3} \right)^{1/2}, \text{ м}^3.$$

Другие параметры рассчитывают по формулам, данным выше.

Пример расчета основных технико-эксплуатационных параметров самоходного скрепера

Определить технические параметры скрепера по заданной вместимости ковша $q_c = 9,3 \text{ м}^3$, который предназначен для разработки грунтов III категории прочности, $k_{yд.с} = 200000 \text{ Н/м}^2$, см. табл. 1.1.

1. Оптимальная масса $m_{опт}$ скрепера. Расчетная формула (3.9), см. гл. 2.3

$$m_{опт} = k_{m_{опт}} \cdot q \cdot \left(\frac{k_{yд.с} \cdot k_3}{g^2 \cdot v_k \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Устанавливают значения параметров, необходимых для расчета.

$k_{m_{опт}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для самоходного скрепера $k_{m_{опт}} = 12$, см. табл. 1.2.

k_3 – размерный коэффициент подобия. Для скреперов

$$k_3 = 1,8 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3, \text{ см. табл. 1.2.}$$

v_k – скорость скрепера при копании грунта, $v_k = 1 \dots 2 \text{ м/с}$.

l_x – дальность холостого передвижения скрепера, $l_x = 700 \text{ м}$, табл.

3.3.

Подставляют данные в расчетную формулу, получают

$$m_{\text{опт}} = 12 \cdot 9,3 \cdot \left(\frac{200000 \cdot 1,8 \cdot 10^4}{9,81^2 \cdot 1,5 \cdot 700} \right)^{1/2} = 21090 \text{ [кг]}.$$

2. Расчет оптимальной энергонасыщенности скрепера $(N/m)_{\text{опт}}$, расчетная формула (3.12), см. гл. 2.3.

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = k_{\text{эН}} \left(\frac{g^2 \cdot v_{\text{к}} \cdot l_{\text{х}}}{k_{\text{уд.с}} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.}$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

$k_{\text{эН}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для самоходных скреперов $k_{\text{эН}} = 0,08$, см. табл. 1.2.

k_{13} – размерный коэффициент подобия, м³/Вт. Для скреперов $k_{13} = 0,55 \cdot 10^{-4}$ м³/Вт, см. табл. 1.2.

Другие величины приведены ранее.

Подставляют данные в расчетную формулу, получают

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = 0,08 \left(\frac{9,81^2 \cdot 1,5 \cdot 700}{200000 \cdot 0,55 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/2} = 7,6 \text{ [Вт/кг]}.$$

3. Расчет мощности двигателя скрепера. Расчетная формула (3.18):

$$N = \frac{1}{k_{m_{\text{опт}}}} \cdot m_{\text{опт}} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v_{\text{к}} \cdot l_{\text{х}}}{k_{\text{уд.с}} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт.}$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

k_{13} – размерный коэффициент подобия, м³/Вт. Для скреперов $k_{13} = 0,55 \cdot 10^{-4}$ м³/Вт, см. табл. 1.2.

Значения других исходных величин приведены ранее.

Подставляют соответствующие величины в расчетную формулу, получают

$$N = \frac{1}{12} \cdot 21090 \cdot \left(\frac{9,81^2 \cdot 1,5 \cdot 700}{200000 \cdot 0,55 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/2} = 168195 \text{ [Вт]} \text{ (168,195 кВт)}.$$

4. Расчет максимальной производительности скрепера. Расчетная формула (3.14).

$$P_{\text{max}} = k_{\text{П}} \cdot m \cdot \left(\frac{v_{\text{к}} \cdot k_2 \cdot k_{15}}{k_{\text{уд.с}} \cdot l_{\text{х}}} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

$k_{\text{П}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для скреперов $k_{\text{П}} = 0,14$, см. табл. 1.2.

k_2, k_{15} – размерные коэффициенты подобия. Для скреперов $k_2 = 8$ Вт/кг; $k_{15} = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м³/кг, см. табл. 1.2.

Остальные величины приведены выше.

Подставляют установленные величины в формулу, получают

$$P_{\max} = 0,14 \cdot 21090 \cdot \left(\frac{1,5 \cdot 8 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}}{200000 \cdot 700} \right)^{1/2} = 0,017 \text{ [м}^3/\text{с]} \text{ (60 м}^3/\text{ч)}.$$

Производительность скрепера зависит от дальности рабочих и холостых перемещений машины l_x и удельного сопротивления грунта копанию $k_{yд.с}$. С изменением этих факторов производительность скрепера изменяется.

5. Расчет вместимости ковша скрепера. Выполняется при необходимости, как проверочный расчет, для сопоставления с исходной заданной величиной. Расчетная формула

$$q_n = k_{15} \cdot m_{опт}, \text{ Вт},$$

где k_{15} – размерный коэффициент подобия, м³/кг, для скреперов $k_{15} = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м³/кг, см. табл. 1.2.

Подставляют полученные величины в формулу, получают

$$q_n = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 21090 = 8,4 \text{ [м}^3\text{]}.$$

6. Расчет ширины ковша скрепера. Расчетная формула

$$b_k = k_{19} \cdot \sqrt[3]{m_{опт}}, \text{ м},$$

где k_{19} – размерный коэффициент подобия, для скреперов $k_{19} = 0,1$ м/кг^{1/3}, см. табл. 1.2.

Подставляют соответствующие величины в расчетную формулу, получают

$$b_k = 0,1 \cdot \sqrt[3]{21090} = 2,7 \text{ [м]}.$$

1.2.6. Автогрейдеры

Определение параметров по условиям эксплуатации и мощности двигателя автогрейдера

Оптимальная масса автогрейдера

$$m_{опт} = k_{m_{опт}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{yд.а} \cdot l_p \cdot k_{31}}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}.$$

Оптимальная энергонасыщенность автогрейдера

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{опт} = k_{эн} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{yд.а} \cdot l_p \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}.$$

Максимальная производительность автогрейдера

$$P_{\max} = k_{П} \cdot \left(\frac{m \cdot v_p \cdot l_p \cdot k_2}{k_{yд.а} \cdot k_{31} \cdot N \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ пог. м/с}.$$

Длина отвала автогрейдера

$$B = k_{19} \cdot \sqrt[3]{m}, \text{ м}.$$

Определение параметров по условиям эксплуатации и производительности автогрейдера

$$m = \frac{\Pi^2}{k_{\Pi}^2} \cdot \frac{k_{уд.а} \cdot N \cdot l_x \cdot k_{31}}{v_p \cdot l_p \cdot k_2}, \text{ кг.}$$

Другие параметры рассчитывают по формулам, данным выше.

Примеры расчета основных технико-эксплуатационных параметров автогрейдеров

Определить технические параметры автогрейдера, который предполагается оснастить двигателем мощностью 100 кВт и использовать на работах по резанию и планировке грунтов III категории прочности, см. табл. 1.1.

1. Расчет оптимальной массы $m_{опт}$ автогрейдера. Расчетная формула (3.40).

$$m_{опт} = k_{m_{опт}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{уд.а} \cdot l_p \cdot k_{31}}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Устанавливают величины параметров, необходимые для расчета:

$k_{m_{опт}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации, для автогрейдеров $k_{m_{опт}} = 4$, см. табл. 1.2;

$k_{уд.а}$ – удельное сопротивление резанию грунта отвалом автогрейдера, $k_{уд.а} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, см. табл. 1.1;

k_{31} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^2/\text{Вт}$, для автогрейдеров $k_{31} = 0,3 \cdot 10^{-5}$, $\text{м}^2/\text{Вт}$, см. табл. 1.2;

v_p – рабочая скорость, $v_p = 1,5 \dots 3 \text{ м/с}$, принимаем $v_p = 3 \text{ м/с}$.

По условиям работы автогрейдера принимается случай, когда дальность перемещения при рабочем и холостом ходах примерно равна $l_p \approx l_x$.

Подставляют установленные величины в формулу, получают

$$m_{опт} = 4 \cdot 100000 \cdot \left(\frac{250000 \cdot 0,3 \cdot 10^{-5}}{9,81^2 \cdot 3} \right)^{1/2} = 20400 \text{ [кг]}.$$

2. Расчет оптимальной энергонасыщенности автогрейдера с параметрами, рассмотренными выше, расчетная формула (3.42).

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{опт} = k_{эн} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{уд.а} \cdot l_p \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.}$$

Устанавливают значения величин входящих в формулу.

$k_{эн}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для автогрейдеров $k_{эн} = 0,25$.

Принимают (в качестве примера) рабочий ход равным холостому ходу $l_p \approx l_x$. Другие величины приведены ранее.

Подставляют установленные величины в формулу, при $l_p \approx l_x$ получают

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{\text{опт}} = 0,25 \left(\frac{9,81^2 \cdot 3}{250000 \cdot 0,3 \cdot 10^{-5}} \right)^{1/2} = 4,8 \text{ [Вт/кг]}.$$

3. Расчет максимальной производительности автогрейдера для условий работы, указанных выше. Расчетная формула (3.45).

$$P_{\text{max}} = k_{\Gamma} \cdot \left(\frac{v_p \cdot l_p}{k_{yд.а} \cdot l_x \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ пог. м/с.}$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

k_{Γ} – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для автогрейдеров $k_{\Gamma} = 0,4$, см. табл. 1.2.

k_2 – размерный коэффициент подобия, Вт/кг. Для автогрейдеров $k_2 = 6 \dots 7$ Вт/кг.

Значения других величин приведены выше.

Подставляют установленные величины в расчетную формулу, при $l_p \approx l_x$ получают

$$P_{\text{max}} = 0,4 \cdot \left(\frac{3}{250000 \cdot 0,3 \cdot 10^{-5}} \right)^{1/2} = 0,8 \text{ [м/с]} \text{ (2880 м/ч)}.$$

4. Расчет оптимальной длины отвала автогрейдера. Расчетная формула (3.48).

$$B = k_{19} \cdot \sqrt[3]{m}, \text{ м.}$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

k_{19} – размерный коэффициент подобия, м/кг^{1/3}. Для автогрейдеров $k_{19} = 0,1575$ м/кг^{1/3}, см. табл. 1.2.

Подставляют эту величину в формулу, получают

$$B = 0,15 \cdot \sqrt[3]{15800} = 3,76 \text{ м.}$$

1.2.7. Одноковшовые погрузчики

Определение параметров по условиям эксплуатации и вместимости ковша погрузчика

Оптимальная масса одноковшовых погрузчиков

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot q \cdot \left(\frac{k_{yд.п} \cdot k_3}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Оптимальная энергонасыщенность одноковшовых погрузчиков

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{\text{опт}} = k_{\text{эн}} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{yд.п} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.}$$

Мощность двигателя одноковшовых погрузчиков

$$N = \frac{1}{k_{m_{opt}}} \cdot m_{opt} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{уд.п} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт.}$$

Максимальная производительность одноковшовых погрузчиков

$$П_{max} = k_{п} \cdot m_{opt} \cdot \left(\frac{v_p \cdot k_2 \cdot k_{15}}{k_{уд.п} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с.}$$

Вместимость погрузочного ковша погрузчика

$$q_{п} = k_{23} \cdot m_{opt}, \text{ м}^3.$$

Ширина погрузочного ковша погрузчика

$$b_{п} = k_{19} \cdot \sqrt[3]{m_{opt}}, \text{ м.}$$

Определение параметров по условиям эксплуатации и производительности одноковшовых погрузчиков

Оптимальная масса одноковшовых погрузчиков

$$m = k_{t_{min}} \cdot П \cdot \left(\frac{k_{уд.п} \cdot l}{v \cdot k_2 k_{15}} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Оптимальная вместимость ковша одноковшовых погрузчиков

$$q = \frac{1}{k_{п}} \cdot П \cdot \left(\frac{k_{уд.п} \cdot l}{v \cdot k_3} \right)^{1/2}, \text{ м}^3.$$

Другие параметры рассчитывают по формулам данным выше.

Примеры расчета основных технико-эксплуатационных параметров одноковшового погрузчика

Определить технические параметры одноковшового погрузчика по заданной вместимости ковша $q_{п} = 3,4 \text{ м}^3$, для работы с грунтами I категории прочности, $k_{уд.п} = 120000 \text{ Н/м}^2$, см. табл. 1.1.

1. Расчет оптимальной массы m_{opt} . Расчетная формула (3.9).

$$m_{opt} = k_{m_{opt}} \cdot q \cdot \left(\frac{k_{уд.п} \cdot k_3}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Устанавливают значения параметров, необходимых для расчета.

$k_{m_{opt}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации, для погрузчика $k_{m_{opt}} = 4,4$, см. табл. 1.2;

k_3 – размерный коэффициент подобия, Вт/м^3 , для погрузчиков $k_3 = 7 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3$, см. табл. 1.2;

v_p – рабочая скорость движения, $v_p = 1 \dots 3$, м/с;

l_x – дальность холостого передвижения погрузчика, $l_x = 15$ м, табл. 1.2.

Подставляют данные в расчетную формулу, получают

$$m_{\text{опт}} = 4,4 \cdot 3,4 \cdot \left(\frac{120000 \cdot 7 \cdot 10^4}{9,81^2 \cdot 3 \cdot 15} \right)^{1/2} = 20500 \text{ [кг]}.$$

2. Расчет оптимальной энергонасыщенности погрузчика $(N/m)_{\text{опт}}$, расчетная формула (3.12), см. гл. 2.3.

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = k_{\text{эн}} \frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{\text{уд.п}} \cdot k_{13}}, \text{ Вт/кг}.$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу:

$k_{\text{эн}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для погрузчиков $k_{\text{эн}} = 0,23$, см. табл. 1.2.

k_{13} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^3/\text{Вт}$. Для погрузчиков $k_{13} = 0,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Вт}$, см. табл. 1.2.

Другие величины приведены ранее.

Подставляют данные в расчетную формулу, получают

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = 0,23 \left(\frac{9,81^2 \cdot 3 \cdot 15}{120000 \cdot 0,14 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/2} = 11 \text{ [Вт/кг]}.$$

Величина $(N/m)_{\text{опт}}$ определяется прочностными характеристиками разрабатываемого материала. При необходимости можно разрабатывать материалы предельной для погрузчика прочностью

$$k_{\text{уд.п}} = 0,3 \text{ МПа, табл. 1.1.}$$

В этом случае при той же мощности необходима более тяжелая машина.

3. Расчет мощности двигателя погрузчика. Расчетная формула

$$N = \frac{1}{k_{m_{\text{опт}}}} \cdot m_{\text{опт}} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{\text{уд.п}} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт}.$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу:

k_{13} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^3/\text{кг}$. Для погрузчиков $k_{13} = 0,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Вт}$, см. табл. 1.2.

Значения других исходных величин приведены ранее.

Подставляют соответствующие величины в расчетную формулу, получают

$$N = \frac{1}{4,4} \cdot 20500 \cdot \left(\frac{9,81^2 \cdot 3 \cdot 15}{120000 \cdot 0,14 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/2} = 239000 \text{ [Вт]} \text{ (239 кВт)}.$$

4. Расчет максимальной производительности погрузчика. Расчетная формула (3.14).

$$P_{\text{max}} = k_{\text{п}} \cdot m_{\text{опт}} \cdot \left(\frac{v_p \cdot k_2 \cdot k_{15}}{k_{\text{уд.п}} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Устанавливаем значения величин, входящих в формулу.

k_{Γ} – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для погрузчиков $k_{\Gamma} = 0,31$, см. табл. 1.2.

k_2, k_{15} – размерные коэффициенты подобия. Для погрузчиков $k_2 = 8$ Вт/кг, $k_{15} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м³/кг, см. табл. 1.2.

Остальные величины приведены выше.

Подставляем установленные величины в формулу, получаем

$$P_{\max} = 0,31 \cdot 20500 \cdot \left(\frac{3 \cdot 8 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{120000 \cdot 15} \right)^{1/2} = 0,33 \text{ [м}^3\text{/с]} \text{ (1180 м}^3\text{/ч)}.$$

5. Определяем вместимость *погрузочного* ковша погрузчика. Расчетная формула

$$q_{\Gamma} = k_{23} \cdot m_{\text{опт}}, \text{ м}^3,$$

где k_{23} – размерный коэффициент подобия м³/кг, для погрузчиков

$$k_{23} = (0,11 \dots 0,13) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3\text{/кг}.$$

Подставляют соответствующие величины в расчетную формулу, получают

$$q_{\Gamma} = 0,12 \cdot 10^{-3} \cdot 20500 = 2,46 \text{ [м}^3\text{]}.$$

6. Расчет ширины *погрузочного* ковша погрузчика. Расчетная формула

$$b_{\Gamma} = k_{19} \cdot \sqrt[3]{m_{\text{опт}}}, \text{ м};$$

где k_{19} – размерный коэффициент подобия, для погрузчиков

$$k_{19} = 0,11 \text{ м/кг}^{1/3}, \text{ см. табл. 1.2.}$$

Подставляют соответствующие величины в расчетную формулу.

$$b_{\Gamma.к} = 0,11 \cdot \sqrt[3]{20500} = 3 \text{ [м]}.$$

1.2.8. Экскаваторы-погрузчики

Определение параметров по условиям эксплуатации и вместимости ковша экскаватора-погрузчика

Оптимальная масса экскаватора-погрузчика

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot q \cdot \left(\frac{k_{yд.э} \cdot k_3}{g^2 \cdot v_k \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}.$$

Оптимальная энергонасыщенность экскаватора-погрузчика

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = k_{эн} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{yд.э} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}.$$

Максимальная производительность экскаватора-погрузчика

$$P_{\max} = k_{\Gamma} \cdot m_{\text{опт}} \cdot \left(\frac{v_k \cdot k_2 \cdot k_{15}}{k_{yд.э} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3\text{/с}.$$

Вместимость погрузочного ковша экскаватора-погрузчика

$$q_{\Pi} = k_{23} \cdot m_{\text{опт}}, \text{ м}^3.$$

Ширина погрузочного ковша экскаватора-погрузчика

$$b_{\text{п.к}} = k_{19\text{п}} \cdot \sqrt[3]{m_{\text{опт}}}, \text{ м.}$$

Ширина экскаваторного ковша экскаватора-погрузчика

$$b_{\text{э.к}} = k_{19\text{э}} \cdot \sqrt[3]{m_{\text{опт}}}, \text{ м.}$$

Определение параметров по условиям эксплуатации и производительности экскаватора-погрузчика

Оптимальная масса экскаватора-погрузчика

$$m = k_{t_{\text{min}}} \cdot \Pi \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.э}} \cdot l_x}{v \cdot k_2 k_{15}} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Оптимальная вместимость ковша экскаватора-погрузчика

$$q = \frac{1}{k_{\Pi}} \cdot \Pi \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.э}} \cdot l_x}{v \cdot k_3} \right)^{1/2}, \text{ м}^3.$$

Другие параметры рассчитывают по формулам данным выше.

Примеры расчета основных технико-эксплуатационных параметров экскаватора-погрузчика

Определить технические параметры машины, которая предназначена для экскаваторно-погрузочных работ с экскаваторным ковшом вместимостью $q_{\text{э}} = 0,5 \text{ м}^3$ на грунтах III категории прочности, $k_{\text{уд.э}} = 300000 \text{ Н/м}^2$, см. табл. 1.1.

1. Расчет оптимальной массы экскаватора-погрузчика $m_{\text{опт}}$. Расчетная формула (3.9), см. п. 3.3.

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot q \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.э}} \cdot k_3}{g^2 \cdot v_k \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Устанавливаются значения параметров, необходимых для расчета.

$k_{m_{\text{опт}}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаватора-погрузчика $k_{m_{\text{опт}}} = 4,4$, см. табл. 1.2.

k_3 – размерный коэффициент подобия. Для экскаваторов-погрузчиков $k_3 = 8 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3$, см. табл. 1.2.

v_k – скорость копания, $v_k = 2 \text{ м/с}$.

l_x – дальность передвижения экскаватора-погрузчика по строительному участку, $l_x = 3 \dots 10 \text{ м}$, табл. 1.2.

Подставляют установленные величины в расчетную формулу, получают

$$m_{\text{опт}} = 4,4 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{300000 \cdot 8 \cdot 10^4}{9,81^2 \cdot 2 \cdot 5} \right)^{1/2} = 11000 \text{ [кг]}.$$

2. Расчет оптимальной энергонасыщенности экскаватора-погрузчика $(N/m)_{\text{опт}}$, расчетная формула (3.12), см. гл. 2.3.

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{\text{опт}} = k_{\text{ЭН}} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{\text{уд.э}} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.}$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

$k_{\text{ЭН}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаваторов-погрузчиков $k_{\text{ЭН}} = 0,23$, см. табл. 1.2.

k_{13} – размерный коэффициент подобия, м³/Вт. Для экскаваторов-погрузчиков $k_{13} = 0,1 \cdot 10^{-4}$ м³/кг, см. табл. 1.2.

Другие величины приведены ранее.

Подставляют установленные величины в расчетную формулу.

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{\text{опт}} = 0,23 \left(\frac{9,81^2 \cdot 2 \cdot 5}{300000 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/2} = 4 \text{ [Вт/кг].}$$

3. Расчет максимальной производительности экскаватора-погрузчика на экскаваторных и погрузочно-разгрузочных работах для условий, указанных выше. Расчетная формула (3.14).

$$P_{\text{max}} = k_{\text{П}} \cdot m_{\text{опт}} \cdot \left(\frac{v_k \cdot k_2 \cdot k_{15}}{k_{\text{уд.э}} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с.}$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

$k_{\text{П}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаваторов-погрузчиков $k_{\text{П}} = 0,31$, см. табл. 1.2.

k_2, k_{15} – размерные коэффициенты подобия. Для экскаваторов-погрузчиков $k_2 = 5$ Вт/кг, $k_{15} = 0,4 \cdot 10^{-4}$ м³/кг, см. табл. 1.2.

Остальные величины приведены выше.

Подставляют установленные величины в формулу, получают

$$P_{\text{max}} = 0,31 \cdot 11000 \cdot \left(\frac{2 \cdot 8 \cdot 0,4 \cdot 10^{-4}}{300000 \cdot 5} \right)^{1/2} = 0,07 \text{ [м}^3/\text{с]} \text{ (252 м}^3/\text{ч)}.$$

4. Расчет вместимости погрузочного ковша экскаватора-погрузчика. Расчетная формула

$$q_{\text{П}} = k_{23} \cdot m_{\text{опт}}, \text{ м}^3,$$

где k_{23} – размерный коэффициент подобия, для экскаваторов-погрузчиков $k_{23} = 0,13 \cdot 10^{-3}$.

Подставляют соответствующие величины в расчетную формулу, получают

$$q_{\text{П}} = 0,13 \cdot 10^{-3} \cdot 11000 = 1,43 \text{ м}^3;$$

5. Расчет ширины погрузочного ковша экскаватора-погрузчика. Расчетная формула

$$b_{\text{П.К}} = k_{19} \cdot \sqrt[3]{m_{\text{опт}}}, \text{ м,}$$

где k_{19} – размерный коэффициент подобия, для погрузочного ковша экскаваторов-погрузчиков $k_{19} = 0,107 \text{ м/кг}^{1/3}$.

Подставляют соответствующие величины в расчетную формулу, получают

$$b_{п.к} = 0,107 \cdot \sqrt[3]{11000} = 2,44 \text{ [м]}.$$

6. Расчет ширины экскаваторного ковша экскаватора-погрузчика. Расчетная формула

$$b_{э.к} = k_{19} \cdot \sqrt[3]{m_{опт}}, \text{ м};$$

где k_{19} – размерный коэффициент подобия, для экскаваторного ковша экскаваторов-погрузчиков $k_{19} = 0,033 \text{ м/кг}^{1/3}$.

Подставляют соответствующие величины в расчетную формулу, получают:

$$b_{э.к} = 0,033 \cdot \sqrt[3]{11000} = 0,7 \text{ [м]}.$$

Глава 2. НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА МИНИМИЗАЦИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН

2.1. Теоретические основы анализа продолжительности рабочего цикла землеройных машин

2.1.1. Продолжительность рабочего цикла в системе показателей оценки эффективности землеройных машин

Определение оптимальных параметров землеройной техники и их выбор в зависимости от условий работы требуют наличия **системы показателей**, обеспечивающих объективную оценку полученного решения.

Повышение эффективности строительных машин определяется широтой реализации инновационных технологий и перспективных тенденций развития машиностроения: компьютеризации машин, создания самообучающейся, самотрансформирующейся и многоцелевой техники, машин с безотходной технологией работ, обеспечения высокого уровня комфорта и безопасности для оператора, повышения ресурса, обеспечения сервисного сопровождения, оптимизации технических параметров машин в зависимости от условий эксплуатации. Использование достижений фундаментальных наук и физико-технических эффектов и, прежде всего, нанотехнологических материалов открывает новые перспективы. *Проектирование техники с оптимальными параметрами* представляет существенный резерв интенсификации строительства.

На современном рынке строительной техники потребитель стремится приобрести не только хорошую машину, необходимую для выполнения соответствующих строительных работ. Появилась необходи-

мость в приобретении сопутствующих *нематериальных услуг*, обеспечивающих реализацию всех потенциальных возможностей, заложенных в машину производителем техники. Возникает необходимость в приобретении машин с оптимальными параметрами, которые обеспечивают работу машины в соответствующих условиях эксплуатации с наибольшим эффектом. Кризисные тенденции, периодически проявляющиеся в развитии экономики, подчеркивают эту необходимость.

Наиболее доступным и менее затратным методом интенсификации строительной техники является выбор и проектирование машин с оптимальными параметрами в зависимости от условий эксплуатации. Создатели строительной техники имеют методы определения параметров машин с учетом условий эксплуатации. Однако на этапе определения исходных технических параметров и на этапе задания на проектирование существующие методы не учитывают в полном объеме многообразие проявления эксплуатационных факторов и требуют развития и дополнения. Отсутствует обобщающая модель, увязывающая в своей структуре многообразие и взаимное влияние факторов, определяющих условия эксплуатации: прочностные свойства среды, движение машин при выполнении рабочих, транспортных и холостых перемещений и технические параметры машины и др. Существующие рекомендации рассматривают эти факторы практически отдельно. Они не учитывают противоречивые требования ряда рабочих операций к техническим параметрам машин. При выполнении рабочих операций машина должна иметь большое тяговое усилие и, следовательно, большую массу при холостых перемещениях машины – меньшую.

Предлагается на этапе выбора и разработки технического задания определять основные технические параметры машины конкретного назначения с учетом технических и эксплуатационных факторов системы «машина – среда» на основании общей математической модели.

В условиях рыночной противоречивости и неопределенности коммерческой информации эффективность и рациональные параметры машин целесообразно устанавливать путем деления области поиска на части. На первом этапе эффективность следует оценивать на базе анализа технико-эксплуатационных показателей. На втором этапе при необходимости следует осуществлять технико-экономическую оценку вариантов решения.

В качестве обобщающего показателя эффективности машины предлагается использовать продолжительность рабочего цикла машины – ее математическую модель. Такая обобщающая модель включает в себя систему моделей: сил сопротивления, тяговых усилий, развиваемых двигателем, энергетических соотношений, обеспечивающих реализацию выполнения каждой операции

и другие условия эксплуатации, и является обобщающим показателем технико-эксплуатационной эффективности работы машины в зависимости от условий эксплуатации.

Такой показатель, как время рабочего цикла, широко используется при расчете производительности машины. Однако существующая методика рекомендует время рабочего цикла определять на основе известных параметров существующих машин в заданных условиях эксплуатации главным образом на этапе оценки готовой машины. При этом основные технологические операции машины: рабочая операция, транспортировка, холостой ход и др. рассматриваются отдельно. Не учитывается возможное взаимовлияние операций, которые в ряде случаев предъявляют к техническим параметрам машины противоречивые требования. Отсутствует общая математическая модель, увязывающая в единой зависимости все основные технические параметры машины и параметры, определяющие условия эксплуатации.

Для определения оптимальных параметров машин в зависимости от условий эксплуатации на базе анализа математической модели времени рабочего цикла предложен метод минимизации продолжительности рабочего цикла машины [1].

Математическая модель времени рабочего цикла определяется суммой времени отдельных технологических операций рабочего процесса машины. Аналитические зависимости для расчета времени рабочего цикла рассмотрены в наших работах [1]. Для машины с последовательным выполнением операций время рабочего цикла t_u , определяется по формуле

$$t_u = \sum_1^n t_i \rightarrow \min, \text{ с или } t_u = \sum_1^n \frac{A_i}{N_i} \rightarrow \min, \text{ с,}$$

где t_u – время рабочего цикла машины, с; t_i – время отдельной рабочей операции машины, с; n – количество операций, выполняемых машиной за рабочий цикл;

A_i – работа сил сопротивлений при выполнении соответствующей операции, Нм;

N_i – мощность, которая может быть реализована машиной на выполнение операции, Нм/с.

Математическая модель времени рабочего цикла машины с циклическим режимом работы определяется суммой времени выполнения отдельных рабочих операций с учетом характера их выполнения и условий технологического процесса. Математическая модель времени отдельных операций определяется отношением математических моделей работы сил сопротивлений при выполнении операции к математическим моделям мощности, которая может быть реализована машиной на выполнение соответствующей операции.

Продолжительность рабочего цикла t_u определяет величину других технико-эксплуатационных и коммерческих, рыночных показателей. Эти показатели являются функциями времени рабочего цикла машины t_u . Оптимальные значения этих показателей определяются в значительной степени оптимальным, наименьшим значением показателя t_u .

Производительность машины (конструктивная, техническая, эксплуатационная), которая определяет количество единиц продукции, выработанной за единицу времени

$$\Pi = \frac{q}{t_u}, \quad \Pi = \frac{q \cdot k_H}{t_u \cdot k_p}, \quad \Pi = \frac{q \cdot k_1}{t_u}, \quad \text{ед. прод./ед. врем.}$$

$$\text{Выработка на одного оператора } n_{\text{выпр}} = \frac{\Pi}{n_p} \quad \text{или} \quad n_{\text{выпр}} = \frac{q}{n_p \cdot t_u}.$$

$$\text{Удельная производительность } \Pi_{\text{уд}} = \frac{\Pi}{m} \quad \text{или} \quad \Pi_{\text{уд}} = \frac{q}{m \cdot t_u}.$$

$$\text{Удельная энергоёмкость } N_{\text{уд}} = \frac{N}{\Pi} \quad \text{или} \quad N_{\text{уд}} = \frac{N \cdot t_u}{q}.$$

$$\text{Удельная материалоемкость } m_{\text{уд}} = \frac{m}{\Pi} \quad \text{или} \quad m_{\text{уд}} = \frac{m \cdot t_u}{q}.$$

Обобщенный удельный показатель энергоёмкости и материалоемкости

$$\Pi_{Nm} = \frac{Nm}{\Pi^2} \quad \text{или} \quad \Pi_{Nm} = \frac{N \cdot m \cdot t_u^2}{q^2}.$$

Величина t_u определяет также эффективность машины по рыночным показателям, которые зависят от цены машино-часа $C_{\text{мч}}$ и удельной цены единицы продукции $C_{\text{уд}}$.

Цена единицы продукции, ожидаемая минимальная ее величина ($C_{\text{уд}})_{\text{min}}$, могут быть установлены по известной рыночной цене машины в единицу времени или цене машино-часа, максимальной производительности и минимальной продолжительности рабочего цикла машины t_u

$$C_{\text{уд}} = \frac{C_{\text{мч}} \cdot t_u}{q}.$$

Эффективность в руб. от работы машины в единицу времени, ожидаемая величина могут быть определены по заданной рыночной цене единицы продукции (например стоимости куб. м грунта), максимальной производительности и минимальной продолжительности времени рабочего цикла t_u

$$C = C_{уд} \cdot \Pi \quad \text{или} \quad C = \frac{C_{уд} \cdot q}{t_u}$$

При уменьшении t_u , при прочих неизменных условиях эффект в руб. от использования машины увеличивается.

Выше приняты следующие обозначения: m – масса машины, кг; N – мощность двигателя, Вт; $n_{выр}$ – выработка на одного рабочего, м³/с чел.; Π – производительность конструктивная, м³/с; q – единица продукции, вместимость ковша и др. (м³, м², м, кг и др.); $n_{раб}$ – количество работников, обслуживающих машину, чел.; C , $C_{мч}$ – цена работы машины в единицу времени (например, машино-часа), руб./ч; $C_{уд}$ – цена единицы продукции руб./м³; $k_1 = 3600 \cdot k_u k_H / K_p$; k_u – коэффициент использования машины по времени; k_H – коэффициент заполнения рабочего органа материалом, использования грузоподъемности и др.; K_p – коэффициент разрыхления материала; t_u – время рабочего цикла, с.

Оптимальные значения $m_{опт}$, $(N/m)_{опт}$, $t_{u \min}$ определяются методом минимизации математической модели времени рабочего цикла t_u [1]. Методы расчета $t_{u \min}$ и других параметров рассмотрены в гл. 2.2.

Оценку эффективности по технико-эксплуатационным показателям t_u , Π , $\Pi_{выр}$, $\Pi_{уд}$, $N_{уд}$, $m_{уд}$ и Π_{Nm} целесообразно осуществлять при одинаковой надежности сравниваемых машин. Считается, что на рынок выпускают только надежные машины с обеспеченным сервисным сопровождением. Другая техника не пользуется спросом. При необходимости оценка машины по показателям надежности выполняется традиционными методами на последующих этапах проектирования машины.

Продолжительность рабочего цикла технологической машины следует рассматривать в качестве обобщенного показателя технико-эксплуатационной эффективности машины в соответствующих условиях эксплуатации. На основании минимизации модели показателя t_u [1] на этапе формирования задания на проектирование можно установить в зависимости от условий эксплуатации оптимальные основные исходные технические параметры машины $m_{опт}$, $(N/m)_{опт}$, $t_{u \min}$, Π_{max} , q , N и др.

Показатели технико-эксплуатационной эффективности: максимальная производительность Π_{max} , минимальные энергоемкость $N_{уд}$, материалоемкость $m_{уд}$ и соответствующий обобщенный показатель Π_{Nm} , а также значения показателей коммерческой эффективности по цене машины в единицу времени C и цене единицы продукции $C_{уд}$ являются функциями t_u . Они принимают оптимальное значение или близкое к оптимальным в зонах с минимальным значением времени рабочего цикла машины $t_{u \min}$.

На основании установленных оптимальных параметров $m_{опт}$, $(N/m)_{опт}$ может быть решена задача выбора из существующих на рын-

ке или в парке техники машины, обеспечивающей в заданных условиях эксплуатации работу с максимальным эффектом. Выбор машины осуществляется по оптимальным значениям основных технических параметров: оптимальной массе m_{opt} и оптимальной энергонасыщенности $(N/m)_{opt}$, которые рассчитываются методом минимизации математической модели времени рабочего цикла [1], см. гл. 2.2.

По величине $t_{ц min}$, на основании рассмотренных выше зависимостей, могут быть в порядке прогноза установлены предельные значения основных технико-эксплуатационных показателей машины: максимальная производительность Π_{max} , минимальные энергоемкость $N_{y\partial}$, материалоемкость $m_{y\partial}$ и соответствующий обобщенный показатель Π_{Nm} , а также значения показателей коммерческой эффективности по цене машины в единицу времени C и цене единицы продукции $C_{y\partial}$.

2.1.2. Метод минимизации продолжительности рабочего цикла в системе расчетов землеройных машин

Определение времени рабочего цикла является важным этапом расчета производительности землеройной машины. Существующая методика рекомендует время рабочего цикла определять на основе известных параметров существующих машин в заданных условиях эксплуатации.

Основные технологические операции землеройной машины: копание грунта, его перемещение, холостой ход и др. рассматриваются отдельно. Не учитывается возможное взаимовлияние операций, которые в ряде случаев предъявляют к техническим параметрам машины противоречивые требования. Процесс копания требует больших тяговых усилий и, следовательно, большой массы. Процесс холостого хода, наоборот, — большей скорости и меньшей массы.

Используемые в расчетах зависимости не позволяют в полном объеме учитывать влияние на технические параметры машины (массу m , мощность N , вместимость ковша q , размеры рабочего органа и др.), изменение условий эксплуатации (дальность перемещения, глубину копания, свойства грунта: прочность $k_{y\partial}$, плотность γ , углы внешнего и внутреннего трения, коэффициент сцепления φ_c разрабатываемого грунта).

Отсутствует общая математическая модель, увязывающая в единой зависимости все основные технические параметры машины и параметры, определяющие условия эксплуатации.

Для определения оптимальных параметров землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации в учебном пособии предложен метод минимизации продолжительности рабочего цикла машины, ко-

торый позволяет рассмотреть все отдельные рабочие операции во взаимосвязи в единой математической модели.

Метод основан на рассмотрении общей математической модели рабочего цикла машины и позволяет анализировать работу машины с учетом многообразия влияющих на процесс факторов, а также оптимизировать процесс по важному обобщенному показателю эффективности рабочего цикла t_u с учетом взаимовлияния всех операций технологического цикла (копание, транспортировка грунта, холостой ход и др.). Математическая модель продолжительности рабочего цикла включает в себя систему моделей сил сопротивления, тяговых усилий, развиваемых двигателем, и энергетические соотношения, обеспечивающие реализацию выполнения каждой рабочей операции.

Влияющие на процесс работы машины параметры, которые входят в модель, рассматриваются в качестве независимых переменных. Возможная взаимосвязь между параметрами устанавливается на последующих этапах анализа процесса.

Продолжительность рабочего цикла t_u является одним из обобщающих показателей технико-эксплуатационной эффективности машины.

Обобщенные относительные показатели (производительность, удельная энергоемкость и материалоемкость, себестоимость единицы продукции и др.) являются функцией продолжительности рабочего цикла см. п.1.1, [4]. Оптимальные значения этих показателей определяются в значительной степени оптимальным значением продолжительности рабочего цикла.

Экономическая оценка осуществляется после выявления машин, имеющих высокий технико-эксплуатационный эффект на основании разделения области поиска на части.

Основу математических зависимостей отдельных операций составляют модели физико-механических явлений и их последовательность, лежащие в основе процесса взаимодействия инструмента (ножа, зуба, ковша, колесного или гусеничного двигателя) со средой (грунтом, строительным материалом). Анализ (минимизация) модели продолжительности рабочего цикла или процесса взаимодействия инструмента со средой позволяет определить основные технико-эксплуатационные параметры машины (m , N , t_u , Π и др.) и влияние на эти параметры факторов, определяющих условия эксплуатации (физико-механические свойства среды, расстояние рабочих и холостых перемещений машины и др.).

Метод минимизации времени рабочего цикла основывается на основных законах механики, которые широко используются в теории разрушения грунтов, математических моделях рабочих процессов различной степени подобия реальным системам и зависимостях теории

подобия. Это позволяет использовать метод для решения инженерных задач различного вида и сложности на различных этапах создания и использования землеройной техники.

На этапе проектирования, особенно при формировании технического задания, метод может быть использован для более обоснованного определения исходных оптимальных технических m_{opt} , $(N/m)_{opt}$, N и др. и эксплуатационных (t_u , Π , $N_{y\partial}$, $m_{y\partial}$, $C_{y\partial}$ и др.) параметров в зависимости от предполагаемых условий эксплуатации (прочности и физико-механических свойств материала, дальности рабочих и холостых передвижений машины и др.).

На этапе эксплуатации метод позволяет решить задачи по выбору традиционной землеройной техники в зависимости от условий эксплуатации для получения высоких технико-эксплуатационных показателей и прибыли. Определяются время цикла, производительность, необходимое количество техники и автоземлевозов, расход топлива, ожидаемый коммерческий эффект и др.

Метод анализа (минимизации) математических моделей времени рабочего цикла землеройных машин позволяет по заданным условиям эксплуатации выбрать землеройную машину, которая обеспечивает наибольший технико-эксплуатационный эффект (минимальное время цикла, максимальную производительность, минимальные удельные показатели энергоемкости и материалоемкости). Метод позволяет решить также обратную задачу для существующих машин с известными параметрами - выбрать условия эксплуатации (грунт, дальность перемещения и др.), в которых машина обеспечивает наибольший технико-эксплуатационный эффект.

Выбор машины из существующих для соответствующих условий эксплуатации (прочность грунта, дальность перемещения и др.) осуществляется по расчетным оптимальным значениям величин m_{opt} и $(N/m)_{opt}$. Из существующих машин наибольший эффект будет обеспечивать машина с параметрами m и N/m , ближайшими к расчетным. Величины m_{opt} и $(N/m)_{opt}$ определяются, как показано ниже, из условия получения (для заданных условий эксплуатации) минимального значения времени цикла $t_u - min$ и максимальной производительности $\Pi - max$, см. гл 2.2. Поэтому машина с параметрами m и N/m , ближайшими к расчетным величинам m_{opt} и $(N/m)_{opt}$ будет обеспечивать получение оптимальных технико-эксплуатационных показателей t_u , Π , $N_{y\partial}$, $m_{y\partial}$, $C_{y\partial}$.

Технико-экономические вопросы связанные со стоимостью машины, условиями организации сервиса и поставки запчастей, решаются на базе существующих экономических методов расчета на последующих этапах анализа. Такой способ получения оптимального решения, путем деления области анализа на части, когда вначале отыскиваются оптимальная машина, обеспечивающая высокие технико-

эксплуатационные показатели работы, а затем результат уточняется расчетом экономических показателей, соответствует методам дихотомизации поиска оптимального результата.

Реализация метода минимизации не требует знаний, касающихся конструктивных и кинематических схем машины. Эта информация устанавливается на последующих этапах расчета по полученным оптимальным параметрам m , N , $N_{y\partial}$, $m_{y\partial}$, Π_{Nm} и др. Определение продолжительности протекания процесса основывается на анализе базовых закономерностей механики, определяющих взаимодействие рабочего органа со средой.

Отмеченное положение позволяет использовать метод минимизации продолжительности рабочего цикла на этапе оценки инновационных технических систем, используя только математические модели физико-механических процессов, определяющих характер воздействия инструмента на разрабатываемую среду.

При оценке инновационных технических предложений могут быть решены задачи по определению показателей, определяющих эффективность нового предложения.

Полученные исходные величины используются в дальнейшем для выполнения традиционных тяговых расчетов, устойчивости, прочности и технико-экономических расчетов.

Метод минимизации продолжительности рабочего цикла позволяет получить оптимальные решения для конкретных машин и условий эксплуатации. Обобщение полученного оптимального решения на другие подобные технические объекты и условия эксплуатации осуществляется на основе методов теории подобия технических систем, см. гл. 2.2 и 2.3.

Соответствие величин параметров, полученных методом минимизации времени рабочего цикла, реальным величинам, протекающим в реальных условиях эксплуатации, определяется уровнем подобия принятой математической модели процесса. В учебном пособии анализ процессов построен на использовании моделей с различной степенью подобия к реальным объектам, см. гл. 2.1, 2.2, 2.3. Точность расчетов, с учетом принятого уровня подобия, соответствует 11...15 %. Точность возрастает с ростом степени подобия принятой математической модели реальным процессам.

Рассмотрение и анализ математических моделей, определяющих оптимальные значения массы машины m_{opt} и энергонасыщенности $(N/m)_{opt}$, показывают, что более тяжелая или энергонасыщенная машина имеет более широкий диапазон условий эксплуатации, в котором машина работает эффективно. Машина с оптимальной массой и энер-

гонасыщенностью при изменении этих величин в пределах $\pm 5 \dots 7$ % от оптимальных, рассчитанных по формулам (см. гл. 2.2, 2.3), эффективно используется в диапазоне изменения прочности грунта и других условий эксплуатации в диапазоне $\pm 17 \dots 23$ % от величин, при которых были получены расчетные значения $m_{опт}$ и $(N/m)_{опт}$.

Регрессионные зависимости между параметрами землеройных машин в ряде случаев получают на основании обработки соответствующей статистической информации [16]. Регрессионные формулы, однако, не позволяют получить надежный результат. В этом случае не принимается во внимание, что величины, составляющие статистическую совокупность имеют существенно разные количественные и качественные весовые характеристики. Регрессионные зависимости позволяют получить приближенное решение в условиях, когда отсутствуют математические закономерности, например, при решении общих задач экономического характера.

Определение технико-эксплуатационных параметров и выбор машины в зависимости от условий эксплуатации методом минимизации продолжительности рабочего цикла машины основываются на анализе моделей процесса различного назначения и вида, которые включают в себя:

- *структурную модель рабочего цикла машины;*
- *теоретические модели, определяющие продолжительность отдельных операций, составляющих рабочий цикл;*
- *математическую модель продолжительности всего рабочего цикла машины;*
- *математические модели, определяющие технико-эксплуатационные параметры землеройной машины (время цикла, производительность, удельные энерго- и материалоёмкость и др.);*
- *модели, определяющие связи подобия между параметрами машины.*

Метод минимизации продолжительности рабочего цикла машины осуществляется последовательно. Определяется место машины в технологическом процессе. Устанавливается структурная модель процесса. Устанавливается последовательность выполнения операций в структуре рабочего цикла, возможность их совмещения и вероятность появления. Формируются математические модели для расчета продолжительности каждой операции в зависимости от технических и эксплуатационных параметров системы. Формируется математическая модель для расчета продолжительности всего рабочего цикла. Осуществляется анализ полученной функции и оптимизация значений влияющих факторов.

2.1.3. Структурные модели рабочего цикла землеройных машин

Экскаваторы, рыхлители, землеройно-транспортные машины являются машинами циклического действия. В соответствии с технологией работ структура рабочего цикла машины состоит из ряда структурных элементов — рабочих операций. Вид и последовательность выполнения операций определяются технологией строительных работ, конструкцией машины и рабочего органа.

Структурная модель рабочего цикла землеройной машины с циклическим рабочим процессом.

В структуру продолжительности рабочего цикла $t_{ц}$ входят ряд операций, выполняемых в определенной последовательности: операция опускания рабочего органа на поверхность грунта t_o , заглубление рабочего органа в грунт $t_з$, операция отделения грунта от массива или операция копания t_k , подъем рабочего органа с грунтом $t_{пд}$, перемещение грунта к месту укладки, локализация грунта $t_{пр}$, выгрузка грунта $t_в$, подъем пустого рабочего органа $t_{пд.х}$ и перемещение порожней машины или рабочего органа от места укладки грунта обратно в забой или холостой ход t_x . Кроме перечисленных имеет место ряд вспомогательных операций $t_{всп}$ — время на позиционирование машины или рабочего органа, переключение передач, время на разгон и торможение и др.

Структурная модель времени рабочего цикла машины на основании рассмотренного определяется в виде суммы времени отдельных операций.

$$t_{ц} = t_o + t_з + t_k + t_{пд} + t_{пр} + t_в + t_{пд.х} + t_x + t_{всп}, \text{ с.} \quad (1.1)$$

Определяющими операциями рабочего цикла являются операции копания t_k , перемещения грунта к месту укладки $t_{пр}$ и перемещение порожней машины или рабочего органа в забой к месту экскавации грунта t_x . Ряд операций совмещаются и протекают одновременно — опускание рабочего органа $t_{оп}$ и заглубление $t_з$; операция подъема груженого ковша $t_{пд}$ и перемещение грунта $t_{пр}$, операция выгрузки ковша $t_в$, подъема пустого ковша $t_{пд.х}$ и операция холостого хода t_x , а также ряд вспомогательных операций: позиционирование, разгон, торможение протекают как совмещенные с другими операциями.

Время рабочего цикла, на основании рассмотренных положений, определяется как сумма времени на выполнение определяющих операций в виде суммы двух или трех слагаемых. Время на выполнение остальных операций, в том числе вспомогательных, учитывается коэффициентами в виде множителей, увеличивающих время определяющих операций. Это упрощает анализ. Точность решения повышают на последующих этапах расчета путем более детального определения коэффициентов влияния на основе более глубокого теоретического и экспериментального анализа процесса.

Зависимость для определения продолжительности рабочего цикла $t_{ц}$, с учетом сказанного, принимает вид суммы из трех членов

$$t_{ц} = k_1 \cdot t_{к} + k_2 \cdot t_{пр} + k_3 \cdot t_{х}, \text{ с,} \quad (1.2)$$

где k_1 – безразмерный коэффициент, учитывающий время на операции опускания рабочего органа на грунт t_o , время на заглубление рабочего органа в грунт t_3 и время на вспомогательные операции при выполнении операции копания грунта;

k_2 – безразмерный коэффициент, учитывающий время на подъем загруженного рабочего органа грунтом, время выгрузки грунта и время на вспомогательные операции при выполнении операции перемещения грунта к месту локализации;

k_3 – безразмерный коэффициент, учитывающий время на подъем пустого рабочего органа машины и время на вспомогательные операции, выполняемые при движении порожней машины.

Величина безразмерных коэффициентов устанавливается на основании теоретическо-экспериментальных зависимостей, структура которых имеет вид

$$k_1 = \left(1 + \frac{t_o + t_3 + t_{всп1}}{t_{к}}\right);$$

$$k_2 = \left(1 + \frac{t_{пд} + t_{в} + t_{всп2}}{t_{пр}}\right);$$

$$k_3 = \left(1 + \frac{t_{пд.х} + t_{всп3}}{t_{х}}\right),$$

где $t_{всп1}$, $t_{всп2}$, $t_{всп3}$ – время на выполнение вспомогательных операций позиционирования, разгона, торможения и другие при выполнении соответствующих определяющих операций.

Величины $t_{всп}$ могут быть установлены теоретически или экспериментально на основе хронометрирования процесса.

Аналогично строится структурная модель из двух слагаемых:

$$t_{ц} = k_1 \cdot t_{к} + k_3 \cdot t_{х}, \text{ с,} \quad (1.3)$$

где k_1 – безразмерный коэффициент, учитывающий время на операции t_o , t_3 , $t_{всп1}$, $t_{пд}$, $t_{в}$, $t_{всп2}$;

$$k_1 = 1 + (t_o + t_3 + t_{всп1} + t_{пд} + t_{в} + t_{всп2}) / t_{к}.$$

Остальные обозначения указаны ранее.

Структурная модель рабочего цикла многоцелевой землеройной машины с циклическим рабочим процессом

Машины с двумя видами рабочего оборудования или с рабочим органом многоцелевого назначения являются многоцелевыми или гибридными. Машины такого типа получили широкое применение, главным образом, на работах по реконструкции объектов, ремонтных, вос-

становительных работах и строительстве в стесненных условиях. К машинам этого типа относятся экскаваторы-погрузчики, экскаваторы-бульдозеры, бульдозерно-рыхлительные агрегаты и другие машины, на которых установлено несколько видов рабочего оборудования.

Структура рабочего цикла таких машин включает в себя выполнение технологических операций, которые выполняются каждым видом рабочего оборудования. При составлении структурной модели времени рабочего цикла многоцелевой машины необходимо учитывать выполнение многоцелевой машиной всех операций, выполняемых установленным оборудованием в полном объеме. Последовательность выполнения рабочих операций определяется технологией работ или операции выполняются в произвольной последовательности.

Машина работает в этом случае при равновероятном использовании каждого из видов оборудования.

Время рабочего цикла многоцелевой машины определяется суммой времени рабочих циклов операций при работе каждого из видов оборудования

$$t_{ц} = \sum_1^n p_i \cdot t_{цi}, \text{ с}, \quad (1.4)$$

где $t_{цi}$ – время рабочего цикла i -го оборудования, с;

p_i – вероятность использования i -го оборудования.

Для многоцелевой машины с двумя видами оборудования (экскаваторы-погрузчики, бульдозерно-рыхлительные агрегаты, экскаваторы-бульдозеры и др.) рабочий цикл определяется суммой

$$t_{ц} = p_1 \cdot t_{ц1} + p_2 \cdot t_{ц2}, \text{ с}, \quad (1.5)$$

где $t_{ц1}$ – время рабочего цикла машины с оборудованием первого вида, с;

$t_{ц2}$ – время рабочего цикла машины с оборудованием второго вида, с;

p_1 – вероятность выполнения работ первого вида;

p_2 – вероятность выполнения работ второго вида.

В условиях выполнения всего объема работ на объекте принимается $p_1 \approx p_2 \approx 1$.

Структура рабочего цикла для каждого вида рабочего оборудования рассмотрена выше. При составлении модели принимают, что рабочее оборудование каждого вида выполняет свой рабочий цикл в полном объеме в требуемой последовательности, поэтому вероятностные характеристики не учитываются.

Структурная модель рабочего цикла землеройной машины с непрерывным рабочим процессом

Рабочий процесс такой машины рассматривается в виде последовательного выполнения основной рабочей операции разработки

грунта ротором или цепным рабочим органом t_k и вспомогательных операций, например позиционирование рабочего органа, опускание t_o рабочего органа и др. При завершении основной операции по разработке грунта рабочий орган поднимают из забоя $t_{пд.х}$, выводят из него и при необходимости позиционируют машину вне забоя $t_{поз2}$. От одного забоя к другому машину непрерывного действия транспортируют на трейлере. В противном случае необходимо учесть операцию по перемещению машины своим ходом от забоя к забою – холостой ход t_x .

Принимая во внимание рассмотренную модель, структуру рабочего цикла машины непрерывного действия можно представить выражением вида:

$$t_{ц} = t_{поз1} + t_o + t_k + t_{пд.х} + t_{поз2}, \text{ с}, \quad (1.6)$$

где $t_{поз1}$ – время на выполнение операции позиционирования машины на начальном участке, с;

t_o – время выполнения операции опускания рабочего органа, с;

t_k – время выполнения основной операции разработки грунта, с;

$t_{пд.х}$ – время выполнения операции подъема рабочего органа, с;

$t_{поз2}$ – время операции позиционирования машины на конечном этапе работы, с.

При необходимости следует учитывать операцию холостого хода t_x при передвижении машины с одного участка работы к другому.

Основная операция машины непрерывного действия – операция копания грунта рабочим органом роторного или цепного типа t_k – является сложным процессом.

Условно операцию по разработке грунта роторным или цепным рабочим органом можно представить в виде трех операций: отделения грунта от массива – операция резания t_p , перемещения отделенного грунта резцом или ковшом $t_{пр}$ и операции по транспортировке грунта t_m к месту укладки или локализации. Практически эти операции осуществляются одним рабочим органом и протекают одновременно. Рабочий орган представляется инструментом совмещенного действия. Уравнение времени рабочего цикла машины непрерывного действия с учетом рассмотренного должно быть дополнено условием равенства продолжительности операций, составляющих операцию разработки грунта

$$t_k = t_p = t_{пр} = t_m, \text{ с}. \quad (1.7)$$

Рассмотренные структурные модели (1.1), (1.3) и (1.5) являются универсальными и справедливы для рабочих органов различного типа. Однако развернутые на их основе математические зависимости в виде функций от технических и эксплуатационных факторов для определения времени рабочего цикла будут справедливы только для машин, у которых такие функции были установлены. Вид таких функций зависит от конструкции рабочего органа и характера взаимодействия машины с грунтом.

2.1.4. Математические модели продолжительности выполнения отдельных операций машины

Время рабочего цикла определяется суммой времени выполнения отдельных операций

$$t_{\text{ц}} = \sum_{1}^n t_{oi}, \text{ с}, \quad (1.8)$$

где n – количество выполненных рабочих операций;

t_{oi} – время выполнения отдельной операции, с.

Время выполнения отдельной операции устанавливается на основании известных закономерностей.

$$t_{oi} = \frac{A_{oi}}{N_{oi}}, \text{ с}, \quad (1.9)$$

где A_{oi} – работа сил сопротивления, преодолеваемых машиной или рабочим органом при выполнении операции, Н·м;

N_{oi} – мощность, которую может реализовать машина на выполнение рабочей операции, Вт (Н·м/с).

Работа сил сопротивления и величина самих сил зависят от конструкции рабочего органа, характера взаимодействия рабочего органа с грунтом и прочностных свойств грунта ($k_{y\delta}$, $\text{tg } \rho$, $\gamma_{\text{эр}}$ и др.).

В зависимости от поставленной задачи величина силы сопротивления копания может быть рассчитана аналитически [4, 16] или на основании формул, предложенных проф. Н.Г. Домбровским [12].

Мощность, которую может реализовать землеройная машина при выполнении операции резания грунта для большинства типов землеройных машин, включая одноковшовые экскаваторы, определяется величиной тяги, развиваемой двигателем машины, массой машины и рядом других технико-эксплуатационных факторов ($\varphi_{\text{сц}}$, f , δ , i , $k_{\text{з.д}}$). Мощность существенно определяется скоростью движения рабочего органа при копании. Скорость рабочего органа при копании грунта или движении машины в забое имеет технологические ограничения. При копании скорость рабочего органа не должна превышать значения $v_p \leq 0,5 \dots 1,5$ м/с. Скорость копания, превышающая указанную величину, приводит к росту энергоемкости процесса экскавации [12]. Далее рассматривается формирование математических моделей отдельных операций на основании простейших зависимостей. При необходимости метод допускает возможность любого обоснованного усложнения математической модели.

Определение времени продолжительности операции копания

$$t_{\text{к}} = \frac{A_{\text{к}}}{N_{\text{к}}}, \text{ с}.$$

Работа сил сопротивления копания определяется

$$A_K = W_K \cdot l_K, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Силы сопротивления копанью (резанию) W_K с учетом сил сопротивления передвижению самой машины в процессе резания имеют вид

$$W_K = k_{y\partial.k} \cdot bh_K + gm f_K, \text{ Н.} \quad (1.10)$$

На этапе решения общей задачи в приближенном виде величину сопротивления копанью достаточно оценить по формуле проф. Н.Г. Домбровского [12] или ее уточненному варианту. Более точное решение может быть получено аналитически на основании теории механики сплошной среды

$$A_K = (k_{y\partial.k} \cdot bh_K + gm f_K) \cdot l_K, \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (1.11)$$

Мощность, которая может быть реализована на рабочем органе машины на этапе выполнения операции копания, определяется по формуле

$$N_K = T_{сц} \cdot v_K, \text{ кВт.}$$

Усилие, которое может быть реализовано на режущем элементе рабочего органа, определяется величиной тягового усилия машины по сцеплению $T_{сц} = gm k_{\phi} \phi_{сц}$, уменьшенному на преодоление сопротивления движению самой машины и буксование.

$$T_{сц} = gm (k_{\phi} \phi_{сц} - f_K \pm i) (1 - \delta_K) \eta \cdot k_{з\partial}, \text{ Н.} \quad (1.12)$$

или

$$T_{сц} = gm k_{\phi} \cdot k_K, \text{ Н.}$$

На основании рассмотренного получаем

$$N_K = gm k_{\phi} \cdot k_K \cdot v_K, \text{ Вт.} \quad (1.13)$$

Величина скорости копания v_K имеет технологические ограничения $v_K \leq 0,5 \dots 3$ м/с. Превышение скорости приводит к росту энергетических затрат на операцию копания [16].

Время продолжительности операции копания на основании рассмотренного можно установить в виде функции от технических и эксплуатационных факторов, определяющих условия эксплуатации

$$t_K = \frac{(k_{y\partial.k} bh_K + gm f_K) \cdot l_K}{gm v_K \cdot k_K}, \text{ с.} \quad (1.14)$$

Выше приняты следующие обозначения:

A_K – работа сил сопротивления копанью, Н·м;

N_K – мощность, реализуемая машиной при выполнении операции копания, Вт;

W_K – сила сопротивления копанью, Н;

l_K – путь копания, м;

$k_{y\partial.k}$ – удельное сопротивление копанью грунта соответствующим рабочим органом, Н/м²;

b – ширина рабочего органа (отвала, ковша, зуба и др.), м;

h_K – средняя глубина копания, м;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²;

m – масса машины, кг;

f_k – коэффициент сопротивления передвижению машины при копании;

$T_{сц}$ – тяговое усилие по сцеплению движителя, Н;

v_k – скорость машины при копании, м/с, имеет ограничение $v_k \leq 1 \dots 3$ м/с;

k_φ – коэффициент распределения массы машины на ведущий мост;

$\varphi_{сц}$ – коэффициент сцепления движителя с основанием;

$k_k = (\varphi_{сц} \cdot k_\varphi - f_k \pm i) (1 - \delta_k) \eta \cdot k_{з\delta}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-сцепных свойств движителя;

i – уклон местности;

δ_k – коэффициент буксования движителя при копании;

η – коэффициент полезного действия трансмиссии движителя;

$k_{з\delta}$ – коэффициент загрузки двигателя при копании.

Время операции перемещения или транспортировки грунта $t_{пр}$ перед отвалом или в ковше определяется по аналогичной методике.

$$t_{пр} = \frac{A_{пр}}{N_{пр}}, \text{ с.}$$

Работа сил сопротивления при перемещении грунта $W_{пр}$ определяется

$$A_{пр} = W_{пр} \cdot l_{пр}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Силы сопротивления перемещению грунта

$$W_{пр} = g (m_e f_e + m f_{пр}), \text{ Н.} \quad (1.15)$$

На этапе решения общей задачи в приближенном виде

$$A_{пр} = g (m_e f_e + m f_{пр}) \cdot l_{пр}, \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (1.16)$$

Мощность, которую может реализовать землеройно-транспортная машина на операции перемещения или транспортировки грунта, определяется тяговым усилием машины по сцеплению и скоростью машины при транспортировке грунта

$$N_{пр} = g m \cdot v_{пр} \cdot (k_\varphi \cdot \varphi_{сц} - f_{пр} \pm i) (1 - \delta_{пр}) \eta \cdot k_{з\delta}, \text{ Вт,} \quad (1.17)$$

или

$$N_{пр} = g m \cdot v_{пр} \cdot k_{пр}, \text{ Вт,} \quad (1.18)$$

Работа сил сопротивления и мощность, затрачиваемые на перемещение грунта ковшом экскаватора определяются моментом сопротивления, угловой скоростью и ускорением. Особенности определения этих величин рассмотрены в главе 2.2.1. при определении параметров одноковшовых экскаваторов.

Продолжительность операции перемещения или транспортировки грунта определяется зависимостью

$$t_{пр} = \frac{A_{пр}}{N_{пр}} = \frac{(m_e f_e + m f_{пр}) \cdot l_{пр}}{m v_{пр} k_{пр}}, \text{ с.} \quad (1.19)$$

Выше приняты следующие обозначения:

$A_{пр}$ – работа сил сопротивления перемещению грунта, Н·м;

$N_{пр}$ – мощность, реализуемая машиной при выполнении операции перемещения грунта, Вт;

$W_{пр}$ – сила сопротивления перемещению грунта, Н;

$l_{пр}$ – путь перемещения грунта, м;

m_e – масса перемещаемого грунта, кг;

f_e – коэффициент трения грунта;

$f_{пр}$ – коэффициент сопротивления перемещению машины с грунтом;

$v_{пр}$ – скорость перемещения грунта, м/с, имеет технологические ограничения $v \leq 1,5 \dots 3,5$ м/с;

$k_{пр} = (\varphi_{сц} \pm k_{\varphi} - f_{пр} \pm i) (1 - \delta_{пр}) \eta \cdot k_{эд}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-сцепных свойств движителя при перемещении грунта.

Остальные обозначения даны ранее.

Продолжительности времени на операцию холостого хода определяется аналогично.

Работа сил сопротивления при выполнении операции холостого хода

$$A_x = g m f_x \cdot l_x, \text{ Н·м.} \quad (1.20)$$

Мощность, реализуемая машиной при холостом движении

$$N_x = g m \cdot k_x \cdot v_x, \text{ Вт.} \quad (1.21)$$

В этом случае скорость движения машины v_x не имеет технологических ограничений. Практически $g m \cdot k_x \cdot v_x = N_x$. Вся свободная мощность двигателя реализуется на увеличение скорости движения машины.

Следовательно,

$$N_x = N \cdot k_x.$$

Продолжительность операции холостого хода машины t_x на основании рассмотренного определяется зависимостью

$$t_x = \frac{A_x}{N_x} = \frac{g m f_x \cdot l_x}{N \cdot k_x}, \text{ с.} \quad (1.22)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

A_x – работа сил сопротивления при холостом движении машины, Н·м;

N_x – мощность, реализуемая машиной на операции холостого хода, Вт;

f_x – коэффициент сопротивления движению машины на холостом ходу;

l_x – дальность холостого хода, м;

$k_x = (\varphi_{сц} \pm k_\varphi - f_x \pm i) (1 - \delta_x) \eta \pm k_{зд}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-сцепных свойств движителя на этапе холостого движения машины;

δ_x – коэффициент буксования движителя при копании;

N – мощность двигателя, установленного на машине, Вт.

Продолжительность дополнительных операций – опускание рабочего органа (ковша, отвала) t_o , заглубление рабочего органа в грунт t_3 , подъем рабочего органа с грунтом $t_{пд}$, подъем пустого рабочего органа $t_{пд.х}$, выгрузка грунта $t_в$ – определяется аналогичным расчетом. Ниже приведены простейшие модели для расчета времени соответствующих операций.

Время, затрачиваемое на опускание рабочего органа, определяется по формуле

$$t_o = \left(\frac{2h_o f_{co}}{g} \right)^{1/2}, \text{ с}, \quad (1.23)$$

где h_o – высота, с которой опускается рабочий орган, м;

f_{co} – коэффициент сопротивления опусканию рабочего органа,

$$f_{co} = \frac{1}{\eta_\Sigma},$$

где η_Σ – суммарный механический коэффициент полезного действия системы опускания рабочего органа.

Время на заглубление рабочего органа в грунт

$$t_3 = \frac{k_{уд.3} b \cdot \delta \cdot h_p}{g m v_3 \cdot k_3}, \text{ с}, \quad (1.24)$$

где $k_{уд.3}$ – удельное сопротивление заглублению рабочего органа, Н/м² [17];

δ – толщина кромки рабочего органа, заглубляющегося в грунт, м;

v_3 – скорость заглубления, имеет технологические ограничения $v_3 \leq 0,5 \dots 1,5$ м/с, $v_3 \approx v_K$;

$k_3 = (\varphi_{сц} \pm k_\varphi - f_x \pm i) (1 - \delta_3) \eta \pm k_{зд}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-сцепных свойств движителя.

Время на подъем рабочего органа с грунтом

$$t_{пд} = \frac{(m_e + k_\pi m) \cdot h_{пд}}{m v_K k_K \eta}, \text{ с}, \quad (1.25)$$

где $h_{пд}$ – высота подъема рабочего органа с грунтом, м;

m_e – масса поднимаемого грунта, $m_e = q \pm \gamma_e / g$, кг;

q – вместимость ковша, м³;

γ_e – объемный вес грунта, Н/м³;

k_n – коэффициент, учитывающий влияние массы машины на подъем рабочего органа в долях от массы машины;

η – коэффициент полезного действия механизма подъема.

Остальные обозначения даны ранее.

Время на подъем пустого рабочего органа без грунта

$$t_{пд.х} = \frac{k_n \cdot h_{пд}}{v_k k_k \eta}, \text{ с}, \quad (1.26)$$

где $h_{пд}$ – высота подъема рабочего органа без грунта, м;

k_n – коэффициент, учитывающий влияние массы машины на подъем рабочего органа в долях от массы машины.

Остальные обозначения даны ранее.

Время на операцию выгрузки грунта:

а) для случая свободной выгрузки под действием веса грунта

$$t_e = \left(\frac{2h_e f_c}{g} \right)^{1/2}, \text{ с}, \quad (1.27)$$

где h_e – высота, на которой позиционируется рабочий орган, м;

f_c – коэффициент сопротивления при свободной выгрузке, $f_c > 1$, $f_c = 1,15 \dots 1,2$;

б) для случая принудительной выгрузки ковша скрепера

$$t_e = \frac{4gm_e \cdot f_{ep.k} \cdot l_k}{\pi d_{ц}^2 \cdot \rho_{ж} \cdot v_{зц}}, \text{ с}, \quad (1.28)$$

где m_e – масса грунта в ковше, кг;

$f_{ep.k}$ – коэффициент сопротивления движению грунта в ковше с учетом бокового трения и распора грунта при выталкивании, $f_{ep.k} > f_{ep}$;

l_k – длина ковша, м;

$d_{ц}$ – диаметр гидроцилиндров механизма, м;

$\rho_{ж}$ – давление жидкости в гидросистеме механизма выгрузки, Н/м²;

$v_{зц}$ – скорость движения штока гидроцилиндра, имеет ограничение $v_{зц} \leq 1$ м/с.

Время на вспомогательные операции – позиционирование, торможение, разгон и другие – для предварительных расчетов определяется на основании экспериментальных данных и не превышает 5% от времени основных рабочих операций. Для развернутого и более точного анализа продолжительности рабочего цикла указанные величины могут быть установлены аналитически.

2.1.5. Схема формирования математической модели продолжительности рабочего цикла землеройной машины

Структурные схемы рабочего цикла и математические модели времени отдельных операций позволяют составить математическую

модель определения продолжительности всего рабочего цикла машины в зависимости от условий эксплуатации. Суммируя модели продолжительности отдельных операций и группируя последние по характеру влияния массы машины на продолжительность операции, получают общую модель времени рабочего цикла в виде выражения

$$t_{ц} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{m} + \sum_{j=1}^m A_j m, \text{ с,}$$

где A_i, A_j – теоретические размерные зависимости продолжительности отдельных операций от технических и эксплуатационных параметров системы «машина – среда».

Функции A_i и A_j зависят от конструкции рабочего органа и условий эксплуатации. Получение соответствующих функций для каждого вида машин рассмотрено ниже. Например, структурная модель времени рабочего цикла одноковшового погрузчика

$$t_{цп} = t_o + t_k \cdot k_{всп1} + t_{пд} + t_{пр} \cdot k_{всп2} + t_x \cdot k_{всп3}, \text{ с,}$$

На основании теоретических моделей, определяющих время отдельных операций, которые рассмотрены выше, получают

$$t_{цп} = \left(\frac{2h_{пфс}}{g} \right)^{1/2} + \frac{k_{уд.п} b h \cdot l_k \cdot k_{мз} \cdot k_{всп1}}{g m v_3 \cdot k_3} + \frac{m_e \cdot h_{пд} \cdot k_{м пд}}{m v_3 k_3} +$$

$$+ \frac{m_e f_e \cdot l_{пр} \cdot k_{м пр} \cdot k_{всп2}}{m v_{пр} k_{пр}} + \frac{g m f_x \cdot l_x}{N \cdot k_x} \cdot k_{всп3}.$$

Здесь ряд определяющих величин, рассмотренных в гл. 2.1.2, дан с индексом «з», означающим, что величина характеризует параметр одноковшового погрузчика. Например, $k_{уд.з}$ характеризует величину удельного сопротивления материала захвату при работе ковшем погрузчика.

$$\text{Принято также, что } q_n = b h_k \cdot l_k, \text{ м}^3,$$

где q_n – вместимость ковша погрузчика, м³;

b – ширина ковша погрузчика, м;

h_k – средняя толщина слоя захватываемой среды (грунта), м;

l_k – глубина ковша, м.

Остальные обозначения рассмотрены ранее.

Операция захвата груза, которая для одноковшового погрузчика требует обеспечения значительных тяговых усилий, является основной. Операция захвата груза, опускания, подъем ковша протекают эффективно с ограниченными технологическими скоростями

$v_k \leq 1,5$ м/с. Время на выполнение этих операций может быть учтено соответствующими коэффициентами влияния.

Реализация рассмотренного позволяет получить модель определения времени цикла в сокращенной форме записи.

$$t_{цп} = \frac{k_{уд.п} \cdot q_{п} \cdot k_{з.пр}}{gm \cdot v_{к}} + \frac{gm \cdot l_{х} \cdot k_{хп}}{N}, \text{ с,}$$

где $k_{з.пр}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение времени цикла на выполнение операций перемещения груза в ковше, опускания и подъема ковша, $k_{з.пр} = \frac{k_{п} \cdot k_{пр} \cdot k_{всп1}}{k_{з}}$; здесь принято $k_{п}$ –

безразмерный коэффициент, учитывающий время на операции подъема и опускания ковша и перемещения самой машины; $k_{пр}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение времени при выполнении операции перемещения грунта.

$k_{х.п}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние условий эксплуатации на выполнение холостого хода погрузчика,

$$k_{х.п} = \frac{f_{х}}{k_{х}} \cdot k_{всп3}.$$

Для наиболее вероятных условий работы принимают $k_{п} = 3,2$; $k_{пр} = 1,2$; $k_{всп1} = 1,1$; $k_{з.пр} = 7 \dots 8$; $k_{хп} = 0,36$.

Анализ полученной и других подобных зависимостей позволяет определить оптимальное значение массы машины $m_{опт}$, при которой время рабочего цикла в заданных условиях эксплуатации является

минимальным. Из выражения $\frac{dt_{ц}}{dm} = 0$ получают величину оптимальной массы $m_{опт}$, кг. Зависимость $m_{опт}$ подставляют в выражение для определения времени цикла $t_{ц}$ и определяют минимально-возможную продолжительность рабочего цикла $t_{ц\ min}$, с.

На основании этого выражения определяется максимально-возможная для данных условий эксплуатации производительность машины Π_{max} , м³/с.

Рассмотренные зависимости позволяют установить оптимальную величину энергонасыщенности машины. Приведенные выше зависимости для определения $t_{ц}$ содержат влияющие параметры, которые рассматриваются как независимые переменные. Для подобных машин ряд параметров являются зависимыми. Так для ковшовых машин вместимость ковша q увеличивается с увеличением мощности двигателя N по закону $q = k_{13} \cdot N$, см. гл. 2.3.

Математическая модель продолжительности рабочего цикла погрузчика в этом случае принимает вид, см. гл. 2.3,

$$t_{ц} = \frac{k_{уд.п} \cdot k_{13} \cdot N \cdot k_{з.пр}}{mg \cdot v_{к}} + \frac{mg \cdot l_{х} \cdot k_{хп}}{N}, \text{ с.}$$

На основании выражения $\frac{dt_{ц}}{d(N/m)} = 0$ получают оптимальное

значение энергонасыщенности

$$\frac{N}{m} = k_{\text{эн}} \left(\frac{g^2 \cdot v \cdot l}{k_{y\partial} \cdot k_{15}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.}$$

На основании анализа обобщенного показателя энерго- материалоемкости Π_{Nm} из условия $\frac{d\Pi_{Nm}}{dN_{\text{эн}}} = 0$ получают несколько большую

величину энергонасыщенности $(N/m)_{\text{опт}}$. В этом случае коэффициент $k_{\text{эн}}$ в приведенной выше формуле должен быть умножен на величину 1,7.

Виды функций $m_{\text{опт}}$, $(N/m)_{\text{опт}}$, $t_{\text{ц}}$, $t_{\text{ц min}}$, Π_{max} и др. зависят от технических и эксплуатационных параметров системы «машина – среда». Эти функции определяются для каждого вида машины в зависимости от условий эксплуатации. Определение этих функций для каждого вида машин рассмотрено в гл. 2.2.

На этапе эксплуатации величины $m_{\text{опт}}$ и $(N/m)_{\text{опт}}$ являются исходными для выбора машины. Из имеющихся в парке или на рынке следует выбирать машины с параметрами m , N/m ближайшими к $m_{\text{опт}}$ и $(N/m)_{\text{опт}}$. Величина N/m – ближе к большей. В условиях эксплуатации, для которых определены $(N/m)_{\text{опт}}$ и $m_{\text{опт}}$, машина обеспечивает, как показано ниже, см. гл. 2.2, эффективную работу по показателям производительности Π , энергоемкости $N_{y\partial}$ и материалоемкости $m_{y\partial}$. Для нескольких машин с одинаковыми величинами $(N/m)_{\text{опт}}$ и $m_{\text{опт}}$ экономический эффект уточняют по анализу рыночных показателей стоимости машино-часа (руб./ч) и себестоимости единицы продукции (руб./м³), см. гл. 2.5.

При проектировании новой машины указанные зависимости могут быть использованы для получения исходных технических параметров массы m , мощности N , вместимости ковша q и др. в зависимости от условий эксплуатации, которые указываются в техническом задании при традиционных методах проектирования.

2.2. Определение оптимальных параметров и выбор землеройных машин методом минимизации продолжительности рабочего цикла

2.2.1. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров одноковшового экскаватора

Максимальное усилие, развиваемое на зубьях ковша свободно стоящего экскаватора, должно обеспечивать эффективное преодоление сил сопротивлений копанью грунта, для разработки которого предназначается экскаватор. При определении сопротивлений необходимо учитывать действующие на рабочий орган силы сопротивления отделению грунта от массива (резание грунта), призмы волочения, заполнению ковша и подъему ковша с грунтом в процессе экска-

вазии. Для грунтов заданной прочности и конкретного типа рабочего органа величина силы сопротивлений определяется по величине удельного сопротивления копанию [16, 17, 21].

Копание грунта является наиболее энергоёмкой операцией рабочего процесса одноковшовых экскаваторов. При копании на рабочее оборудование действуют сопротивление грунта отделению от массива и гравитационные силы – собственные, присоединенных элементов и транспортируемого в ковше грунта.

Определение сил, развиваемых на зубьях ковша свободно стоящего экскаватора, рассмотрено в работе [2]. Исследованиями установлено, что на свободно стоящий экскаватор в забое действуют значительные реактивные горизонтальные силы [21]. Для предупреждения выталкивания экскаватора из забоя в ходовом оборудовании предусмотрены различные стопорные устройства, обеспечивающие максимальную фиксацию экскаватора за счет сил сцепления движителя с основанием.

Активные силы, которые способен развивать свободно стоящий экскаватор на зубьях ковша, ограничиваются массой машины и её устойчивостью в работе. Максимальное усилие, развиваемое обратной и прямой лопатами на зубьях ковша, зависит от характера рабочего процесса.

Активные силы P_{01} , развиваемые на зубьях ковша, должны быть равны или больше реактивных сил сопротивлений копанию $W_{кэ}$

$$P_{01} \geq W_{кэ}.$$

Методы определения сил сопротивления копанию рассмотрены в ряде работ [4, 12, 17, 30]. Величину сопротивлений копанию принято определять по формуле проф. Н.Г. Домбровского

$$W_{кэ} = k_{уд.э} \cdot b \cdot h, \text{ Н.}$$

Работа, затрачиваемая на преодоление сил сопротивлений при копании грунта, определяется интегралом

$$A_{P_{01}} = A_{W_{кк}} = \int_0^l W_{кэ} \cdot dl, \text{ Н}\cdot\text{м или}$$

$$A_{W_{кк}} = k_{уд.э} \cdot b \int_0^{H_{л}} h \cdot dl, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Множитель $b \int_0^{H_{л}} h \cdot dl$ определяет объём грунта, отделяемого от

массива на пути копания:

$$A_{W_{кк}} = k_{уд.э} \cdot b \cdot h \cdot l_k, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.1)$$

Выражая этот объём через вместимость ковша $q_э$, коэффициент его наполнения k_n и коэффициент разрыхления грунта k_p и принимая

для этапа завершения процесса копания $k_n = k_p = 1$, получаем формулу для определения величины $A_{W_{кэ}}$ в виде зависимости

$$A_{W_{кк}} = k_{уд.э} \cdot q_k, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.2)$$

Если сопротивление $W_{кэ}$ определяется, например методами механики сплошной среды [5, 11], то работа, затрачиваемая на его преодоление, выражается более сложной зависимостью.

Для пути, соответствующего наполнению ковша l_k , работа сил сопротивления определяется по формуле

$$A'_{W_{кк}} = A_{W_{кк}} \cdot k, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Выше приняты следующие обозначения:

k – поправочный коэффициент; $k = 1, 1, \dots, 1, 3$, [21];

$k_{уд.э}$ – удельное сопротивление грунта копанию ковшем экскаватора, $\text{Н}/\text{м}^2$, экспериментальная величина [17];

b – ширина ковша, м;

h – толщина стружки грунта, отделяемой от массива, м;

l_k – путь копания, м;

q_k – вместимость ковша экскаватора, м^3 ;

$A_{P_{01}}$ – работа активных сил, развиваемых машиной на зубьях ковша, $\text{Н}\cdot\text{м}$;

$A_{W_{кэ}}$ – работа сил сопротивлений копанию (реактивных сил), $\text{Н}\cdot\text{м}$.

$$A_{P_{01}} \geq A_{W_{кэ}}.$$

Математическая модель продолжительности операции копания t_k может быть установлена на базе рассмотренных выше положений. Время определяется как отношение работы сил сопротивления копанию $A_{W_{кэ}}$ к мощности, которая может быть реализована на преодоление сил сопротивления $N_{W_{кэ}}$. На основании выражений, рассмотренных выше, получают формулы для определения времени на операцию копания

$$t_k = \frac{k_{уд.э} \cdot b \cdot h \cdot l_k}{m_э \cdot g \cdot k_m \cdot v_k \cdot \eta}, \text{ с} \quad \text{или}$$

$$t_k = \frac{k_{уд.э} \cdot q_k}{m_э \cdot g \cdot k_m \cdot v_k \cdot \eta}, \text{ с}. \quad (2.3)$$

Принятые обозначения приведены выше.

Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров одноковшового экскаватора 1-й – 2-й размерных групп

Характерной особенностью работы малых экскаваторов является необходимость учитывать в структурной модели рабочего цикла их частое перемещение по строительному участку.

Структурная модель продолжительности рабочего цикла однокорового экскаватора, определяемая по материалам проф. Д. П. Волковым [21], имеет вид

$$t_{цэ} = t_k + t_{под} + t_{пов.гр} + t_в + t_{пов.х} + t_{оп}, \text{ с,}$$

где t_k – продолжительность операции копания, с;

$t_{под}$ – время операции подъёма ковша с грунтом, с;

$t_{пов.гр}$ – время поворота платформы и ковша с грунтом к месту выгрузки грунта, с;

$t_в$ – время выгрузки грунта, с;

$t_{пов.х}$ – время поворота платформы с ковшом без грунта обратно в забой, с;

$t_{оп}$ – время опускания ковша, с.

Расчетным является режим экскавации, при котором продолжительность рабочего цикла будет наименьшей при среднемаксимальных исходных данных. При расчете продолжительности рабочего цикла учитывают совмещение рабочих операций. Подъем рабочего оборудования выполняют без совмещения с другими движениями только в начале этой операции, до его извлечения на уровень дневной поверхности. Затем операцию подъема оборудования совмещают с поворотом платформы с рабочим оборудованием на выгрузку, в составе которого энергия затрачивается только на разгон поворотной части. Продолжительность разгона составляет 30...35 % общей продолжительности времени поворота $t_{пов.гр}$.

Для прямых и обратных лопат за основное рабочее движение при копании принимают копание и подъем ковша, а для драглайна – его перемещение по отработываемому откосу тяговым канатом (полиспастом).

Продолжительность выгрузки учитывают только при работе в режиме погрузчиков. Коэффициент использования мощности в этом случае понижают до $k_u = 0,17...0,20$. Для других видов рабочего оборудования выгрузку совмещают с поворотными движениями, поэтому в общем балансе затрат времени её не учитывают.

Поворот платформы без груза выполняют одновременно с безнасосным опусканием рабочего оборудования. Вместе с установкой ковша на исходную позицию следующего рабочего цикла на эти операции затрачивается до 35 % общей продолжительности рабочего цикла у лопат и 27 % - у погрузчиков [21].

Математическая модель продолжительности рабочего цикла однокорового экскаватора. Время рабочего цикла однокорового экскаватора в виде математической модели формируется путем представления каждой операции соответствующим математическим выражением. Такая модель имеет вид

$$t_{цэ} = \frac{q_k \cdot k_{уд.э}}{m_э \cdot g \cdot k_m \cdot v_k \cdot \eta_k} + \frac{q_k \cdot \gamma_{эр} \cdot H_k}{m_э \cdot g \cdot k_m \cdot v_{под} \cdot \eta_{под}} +$$

$$+ \frac{k_{всп.э} \cdot m_{пл.э} \cdot r_э^2 \cdot \varepsilon_э \cdot \varphi_{рад}}{N \cdot \eta_{пов}} + \frac{m_{эр.к} \cdot r_k^2 \cdot \varepsilon_э \cdot \varphi_{рад}}{N \cdot \eta_{пов}} +$$

$$+ \frac{m_{пл.э} \cdot r_э^2 \cdot \varepsilon_э \cdot \varphi_{рад}}{N \cdot \eta_{пов}}, \text{ с.}$$

Первый член модели определяет время на операцию копания t_k , второй – на операцию подъёма ковша $t_{под}$, третий и четвертый – на поворот платформы с ковшом, заполненным грунтом $t_{пов.эр}$, пятый член – время на обратный поворот платформы с пустым ковшом в забой (холостой ход платформы) $t_{пов.х}$.

Выше приняты следующие обозначения:

$m_э$ – общая масса экскаватора, кг;

g – ускорение свободного падения;

k_m – коэффициент перераспределения массы экскаватора на зубья ковша. Принимают $k_m = 0,5 \dots 0,55$;

v_k – средняя скорость копания грунта ковшом экскаватора по данным проф. Н.Г. Домбровского и А.Н. Зеленина, принимают

$v_k = 1 \dots 2$ м/с;

η_k – к.п.д. механизма подъёма ковша, $\eta_{пов} = 0,85$;

$\varphi_{рад}$ – угол поворота платформы экскаватора в рад,

$\varphi_{рад} = \varphi_{град}/57,2$;

$\gamma_{эр}$ – объёмный вес грунта в ковше, $\gamma_{эр} = 15000 \dots 20000$ Н/м³;

H_k – высота подъёма ковша, путь резания грунта, м;

$v_{под}$ – средняя скорость подъёма ковша с грунтом;

$m_{пл.э}$ – масса платформы экскаватора, кг;

$r_э$ – радиус центра массы вращающихся частей экскаватора, м;

N – мощность двигателя, установленного на экскаваторе, Вт;

ε – угловое ускорение платформы, $1/\text{с}^2$;

$\eta_{пов}$ – к.п.д. механизма поворота платформы, $\eta_{пов} = 0,85$;

$k_{всп.э}$ – безразмерный экспериментальный коэффициент, учитывающий время на вспомогательные операции: позиционирование, разгон, торможение и др., $k_{всп.э} = 1,05 \dots 1,25$ [21].

Развернутая математическая модель рабочего цикла экскаватора, рассмотренная выше, требует наличия подробной информации о конструктивно-кинематических параметрах экскаватора (момент инерции платформы, ее угловое ускорение и др.). На этапе эксплуатации такая информация может отсутствовать. Развернутые математические модели используются при расчете новых машин. Общий анализ развернутой математической модели приведен в работе [21], [2]. Ниже

дан анализ приближенной математической модели времени рабочего цикла экскаватора.

Математическая модель продолжительности времени рабочего цикла экскаватора целесообразно составить по упрощенной схеме. При расчете продолжительности рабочего цикла учитывают совмещение рабочих операций. Кроме того, при расчете технических параметров одноковшового экскаватора 1-й – 2-й размерных групп учитывается важный фактор сравнительно частого перемещения машины по строительному участку. В структурную модель рабочего цикла экскаватора в этом случае помимо операции копания введена операция перемещения экскаватора по участку

$$t_{цэ} = k_{всп1} \cdot t_э + k_{всп2} \cdot t_{пр}, \text{ с}, \quad (2.4)$$

где $t_э$ – время на операцию копания – экскавацию грунта, с; $t_{пр}$ – время на операции перемещения экскаватора по участку, с; $k_{всп1}$, $k_{всп2}$ – коэффициенты, учитывающие время на выполнение вспомогательных операций (позиционирование, разгон, торможение и др.).

В формуле (2.4) первый член, определяющий время на операцию экскавации грунта в упрощенном варианте, может быть получен на основе анализа экспериментальных исследований существующих машин [34].

Время рабочего цикла при экскавации определяется по формуле

$$t_э = k_э \cdot t_к, \text{ с}, \quad (2.5)$$

где $t_к$ – время продолжительности операции копания грунта, с;

$k_э$ – безразмерный коэффициент, определяющий увеличение времени рабочего цикла экскаватора на выполнение операций подъема ковша, поворота на выгрузку, выгрузки, поворота платформы с пустым ковшом в забой, опускание ковша.

Величина $t_к$ определяется по формуле (2.3)

$$t_к = \frac{q_к k_{уд.э}}{m_э g \cdot k_m \cdot v_p \cdot \eta}, \text{ с}. \quad (2.6)$$

Величина $k_э$ определяется на основании хронометражных экспериментов с существующими экскаваторами или на основании анализа данных фирм-производителей экскаваторов, например по материалам фирмы Катерпиллер [34]. Для типовых видов работ экскаваторов 1-й – 2-й размерных групп принимают $k_э = 2,5 \dots 2,7$, для более тяжелых машин $k_э = 3,0 \dots 3,5$.

На основании формул (2.5) и (2.6) продолжительность времени рабочего цикла экскаватора может быть установлена по формуле

$$t_э = \frac{k_э \cdot q_к \cdot k_{уд.э}}{m_э \cdot g \cdot k_m \cdot v_p \cdot \eta}, \text{ с}.$$

или

$$t_{\text{э}} = \frac{q_k \cdot k_{\text{уд.э}} \cdot k_{\text{э1}}}{m_{\text{э}} \cdot g \cdot v_p}, \text{ с.}$$

Время на операцию перемещения экскаватора по участку определяется по методике, рассмотренной выше.

$$t_{\text{п}} = \frac{m_{\text{э}} g \cdot l_{\text{п}} \cdot f \cdot k_{\text{всп1}}}{N \cdot k_{\text{пр}}}, \text{ с}$$

или

$$t_{\text{п}} = \frac{m_{\text{э}} g \cdot l_{\text{п}} \cdot k_{\text{пр.э}}}{N}, \text{ с,} \quad (2.7)$$

выше принято

$$k_{\text{э1}} = \frac{k_{\text{э}}}{k_m \cdot \eta} - \text{безразмерный коэффициент, зависящий от увели-}$$

чения времени рабочего цикла экскаватора на выполнение операций подъема ковша, поворота на выгрузку, выгрузки, поворота платформы с пустым ковшом в забой, опускание ковша.

$$k_{\text{пр.э}} = \frac{f \cdot k_{\text{всп1}}}{k_{\text{пр}}} - \text{безразмерный коэффициент, зависящий от тяго-}$$

во-сцепных свойств двигателя и условий эксплуатации.

Выше приведены следующие обозначения: q_k – вместимость ковша экскаватора, м³; $k_{\text{уд}}$ – удельное сопротивление копанью ковшом экскаватора, Н/м²; $m_{\text{э}}$ – масса экскаватора, кг; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; k_m – коэффициент распределения веса экскаватора на зубья ковша; v_p – рабочая скорость копания, м/с; $l_{\text{п}}$ – дальность перемещения экскаватора по участку.

$$k_{\text{пр}} = (\varphi_c k_{\varphi} - f \pm i)(1 - \delta_{\text{пр}})\eta \cdot k_{\text{з.дв}} - \text{безразмерный коэффициент.}$$

Другие обозначения приведены ранее.

Время рабочего цикла экскаватора 1-й — 2-й размерных групп на основании рассмотренного определяется по формуле в виде суммы рабочих операций

$$t_{\text{цэ}} = \frac{q_k \cdot k_{\text{уд.э}} \cdot k_{\text{э1}}}{m_{\text{э}} \cdot g \cdot v_p} + \frac{m_{\text{э}} g \cdot l_{\text{п}} \cdot k_{\text{пр.э}}}{N}, \text{ с,} \quad (2.8)$$

Здесь первое слагаемое определяет время на операции экскавации грунта экскаватором, второе слагаемое учитывает время на операции холостых перемещений экскаватора по участку $k_{\text{всп1}}$ – коэффициент, учитывающий время на выполнение вспомогательных операций (позиционирование, разгон, торможение и др.)

Производительность экскаватора 1-й – 2-й групп на основании соотношения (2.8) определяется по формуле

$$\Pi = \frac{q}{\frac{q_k \cdot k_{уд.э} \cdot k_{э1}}{m_э \cdot g \cdot v_p} + \frac{m_э \cdot g \cdot l_{п} \cdot k_{пр.э}}{N}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.9)$$

Анализ выражений (2.8) и (2.9) показывает, что эти величины существенно зависят от массы машины $m_э$. Минимальное время рабочего цикла экскаватора и максимальная производительность имеют место при оптимальном значении массы экскаватора. Характер изменения $t_{цэ}$ и Π экскаватора от массы m и других влияющих факторов иллюстрируют графики, рис. 1 и рис. 2. На рис. 1 дан график при $q_э = 0,5 \text{ м}^3 - \text{const}$. На рис. 2 дан обобщенный график, когда при изменении мощности N вместимость ковша также увеличивается в соответствии с подобием системы по закону $q_э = k_{13} \cdot N$, см. график на рис. 9 и 10.

Оптимальная масса экскаватора 1-й — 2-й групп определяется на основании выражения $\frac{dt_{ц.э}}{dm} = 0$. Из этого выражения получают

$$m_{опт} = k_{m_{опт}} \left(\frac{k_{уд.п} \cdot q \cdot N}{g^2 v_p \cdot l_{п}} \right)^{1/2}, \text{ кг}, \quad (2.10)$$

где $k_{m_{опт}}$ — безразмерный коэффициент, учитывающий тягово-сцепные и эксплуатационные параметры, определяющие работу экскаватора.

$$k_{m_{опт}} = \left(\frac{k_{э1}}{k_{пр.э}} \right)^{1/2}.$$

Для среднемаксимальных условий принимают $k_{m_{опт}} = 3,9 \dots 4,2$. Предварительные расчеты величины $m_{опт}$ целесообразно осуществлять по более общей зависимости (3.9), см. гл. 2.3.2.

Оптимальная энергонасыщенность экскаватора 1-й — 2-й групп устанавливается на основании минимизации математической модели продолжительности рабочего цикла экскаватора по зависимости (3.1), см. гл.3. или обобщенному показателю энергоемкости и материалоемкости $\Pi_{Nm} = Nm/\Pi^2$, см. гл. 1. На основании анализа выражения

$\frac{dt_{ц}}{d(N/m)} = 0$ получают

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{опт} = k_{эН} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_{п}}{k_{уд.э} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}, \quad (2.11)$$

где $k_{эН}$ — безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации и параметров машины, $k_{эН} = (k_{пр.э}/k_{э1})^{1/2}$. Для наиболее вероятных условий эксплуатации принимают $k_{эН} = 0,24 \dots 0,26$.

Величина $(N/m)_{opt}$ по минимизации обобщенного показателя удельных энергоемкости и материалоемкости $\Pi_{Nm} = Nm/\Gamma^2$ (см. гл. 1) может быть получена аналогично.

Минимальная продолжительность рабочего цикла экскаватора 1-й – 2-й групп определяется подстановкой значения m_{opt} в зависимость для определения времени цикла $t_{\text{ц}}$.

$$t_{\text{ц} \min} = k_{t \min} \left(\frac{k_{y\partial.б} \cdot q \cdot l_{\Gamma}}{N \cdot v_p} \right)^{1/2}, \text{ с}, \quad (2.12)$$

где $k_{t \min}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации и параметров экскаватора.

$$k_{t \min} = 2(k_{\text{э}1} \cdot k_{\text{пр.э}})^{1/2}.$$

Для наиболее вероятных условий работы значение $k_{t \min}$ принимают 2,2...3,0.

Для предварительных расчетов величину $t_{\text{ц} \min}$ определяют на основании общей зависимости (3.13), гл. 2.3.

Максимальная производительность экскаватора 1-й – 2-й размерных групп определяется на основании соотношения $\Pi_{\max} = q/t_{\text{ц} \min}$. После подстановки $t_{\text{ц} \min}$ получают

$$\Pi_{\max} = k_{\Gamma} \left(\frac{q \cdot N \cdot v_p}{k_{y\partial.б} \cdot l_{\Gamma}} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.13)$$

где $k_{\Gamma} = \frac{1}{k_{t \min}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-сцепных свойств движителя и условий эксплуатации. Для приближенных расчетов $k_{\Gamma} = 0,3...0,4$.

Величину Π_{\max} для предварительных расчетов целесообразно рассчитывать по более общей формуле (3.15), см. гл. 2.3.

Максимальную производительность дает экскаватор, работающий в условиях, когда обеспечивается минимальная продолжительность времени рабочего цикла $t_{\text{ц} \min}$.

Выбор экскаватора 1-й – 2-й групп осуществляется по показателям m_{opt} и $(N/m)_{opt}$, которые рассчитываются по формулам (2.10) и (2.11). Выбирают машину с параметрами m , N/m ближайшими к оптимальным. Как следует из рассмотренных выше положений, экскаватор в этом случае будет обеспечивать максимальную производительность при минимальных удельных энергоемкости и материалоемкости. При наличии нескольких машин с одинаковыми параметрами m и N/m расчет уточняется по цене машино-часа и цене единицы продукции C (руб./ч) и $C_{y\partial}$ (руб./м³).

Состав и порядок выбора машины на основании рассмотренных зависимостей приведены в гл. 2.4.

Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров одноковшовых экскаваторов 3-й и более размерных групп рассмотрены в работе [2].

2.2.2. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров бульдозера

Математическая модель продолжительности рабочего цикла бульдозера основывается на анализе структурной модели рабочего цикла машины, см. гл. 2.1. Структурная модель рабочего цикла бульдозера определяется в виде суммы слагаемых времени выполнения отдельных операций

$$t_{\text{ц}} = k_{\text{всп1}} \cdot t_{\text{к}} + k_{\text{всп2}} \cdot t_{\text{пр}} + k_{\text{всп3}} \cdot t_{\text{х}}, \text{ с}, \quad (2.14)$$

где $t_{\text{к}}$ – время выполнения операции копания грунта отвалом бульдозера и заглубления ножа, с;

$t_{\text{пр}}$ – время на операцию перемещения грунта отвалом бульдозера к месту локализации, с;

$t_{\text{х}}$ – время на операцию холостого перемещения бульдозера, с;

$k_{\text{всп1}}, k_{\text{всп2}}, k_{\text{всп3}}$ – безразмерные коэффициенты, учитывающие время на позиционирование, разгон, торможение и другие вспомогательные операции, $k_{\text{всп}} = 1, 1$.

Время на выполнение дополнительных операций (подъем и опускание отвала, выгрузка грунта) может быть рассчитано по формулам, рассмотренным ранее.

Математическая модель продолжительности рабочего цикла бульдозера на основании положений, рассмотренных ранее, п. 2.1.4, записывается в виде зависимости

$$t_{\text{ц}} = \frac{k_{\text{всп1}}(k_{\text{уд.б}}bh_{\text{к}} + gm f_{\text{к}}) \cdot l_{\text{к}}}{gmv_{\text{к}} \cdot k_{\text{к}}} + \frac{k_{\text{всп2}}(m_e f_e + m f_{\text{пр}}) \cdot l_{\text{пр}}}{mv_{\text{пр}} k_{\text{пр}}} + \frac{k_{\text{всп3}} gm f_{\text{х}} \cdot l_{\text{х}}}{N \cdot k_{\text{х}}}, \text{ с}. \quad (2.15)$$

Объединяя слагаемые, в которых время операций зависит от скорости, имеющей технологические ограничения $v_p \leq 1..2$ м/с (копание и перемещение грунта отвалом), и принимая объем грунта перед отвалом равным $q \approx bh_{\text{к}} l_{\text{к}}$, получаем

$$t_{\text{ц}} = \frac{k_{\text{уд.б}} \cdot q \cdot k_{\text{пр.б}}}{gmv_{\text{к}}} + \frac{gm \cdot l_{\text{х}} \cdot k_{\text{х.б}}}{N}, \text{ с}. \quad (2.16)$$

Здесь первое слагаемое определяет время выполнения операций резания и перемещения грунта к месту локализации, второе – время холостого перемещения бульдозера от места локализации грунта к забю.

$k_{\text{пр.б}} = \frac{k_{\text{всп1}} \cdot k_{\text{тк}} \cdot k_{\text{пр}}}{k_{\text{к}}}$ – безразмерный коэффициент, учитываю-

щий увеличение времени операции копания на выполнение операции перемещения грунта отвалом. Для наиболее вероятных условий эксплуатации принимают $k_{пр.б} = 2,4 \dots 2,6$.

$k_{х.б} = \frac{k_{всп3} \cdot f_x}{k_x}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий влия-

ние тягово-сцепных характеристик двигателя. Принимают $k_{х.б} = 0,36 \dots 0,44$.

k_{mk} – безразмерный коэффициент, характеризующий увеличение времени на перемещение машины при копании, $k_{mk} = 1,1 \dots 1,25$.

$k_{пр}$ – безразмерный коэффициент, показывающий увеличение времени на перемещение призмы и машины при транспортировке грунта, $k_{пр} = 1,1 \dots 1,2$.

k_x – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-сцепных свойств двигателя при откате, $k_x = 0,56 \dots 0,6$.

f_x – коэффициент сопротивления передвижению бульдозера, $f_x = 0,1 \dots 0,2$.

При определении t_x принимают во внимание, что в процессе операции холостого хода вся свободная мощность двигателя расходуется на обеспечение движения с максимально возможной скоростью

$$N = mg \cdot v_x \cdot k_x, \text{ Вт.}$$

Остальные обозначения приведены ранее.

Производительность бульдозера на основании соотношения $\Pi = \frac{q}{t_u}$ и выражения t_u определяется по формуле

$$\Pi = \frac{q}{\frac{k_{уд.б} \cdot q \cdot k_{пр.б}}{gmv_k} + \frac{gm \cdot l_x \cdot k_{х.б}}{N}}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (2.17)$$

Анализ зависимостей (2.16) и (2.17) показывает, что минимальная величина времени рабочего цикла t_u и максимальная производительность Π зависят от условий эксплуатации и технических параметров машины. Функция t_u при неизменных условиях эксплуатации имеет минимальное значение при определенной величине массы машины $m_{опт}$. При этом условии машина работает с минимальным временем рабочего цикла $t_u = \min$ и дает максимальную производительность бульдозера.

Графики функций $t_u = f(m)$ и $\Pi = f(m)$, приведенные на рис. 3, 4, иллюстрируют это положение. Экстремальные значения функций определяются известными методами путем определения первой производной функции и приравнивания полученного выражения нулю.

Оптимальная масса бульдозера $m_{опт}$ определяется на основании анализа выражений

$$\frac{dt_u}{dm} = 0 \text{ или } \frac{d\Gamma}{dm} = 0.$$

$$m_{опт} = k_{m\text{ опт}} \left(\frac{k_{уд.р} \cdot q \cdot N}{g^2 v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг.} \quad (2.18)$$

Для предварительных расчетов величину $m_{опт}$, на основании $q = k_{31} \cdot N \cdot l_k$ следует рассчитывать по общей зависимости (3.19), см. гл. 2.3.2.

Здесь $k_{31} = 0,2 \cdot 10^{-5}$, м²/Вт,

$$k_{m\text{ опт}} = \left(\frac{k_{пр.б}}{k_{х.б}} \right)^{1/2} \text{ – безразмерный коэффициент, зависящий от}$$

условий эксплуатации. Для наиболее вероятных условий эксплуатации $k_{m\text{ опт}} = 2,3$.

Полученное соотношение иллюстрируется зависимостью изменения массы машины от прочностных свойств грунта по показателю удельного сопротивления грунта копанию отвалом бульдозера $k_{уд.б}$, рис. 5. Из полученного соотношения следует, что оптимальная масса $m_{опт}$ зависит от прочностных свойств грунта, объема грунта перед отвалом q , мощности N и ряда других технических и эксплуатационных факторов v_p , l_x , φ_c , f и др. При изменении массы бульдозера на $\pm 5...6$ % от оптимального область значений прочности грунта, наиболее эффективно разрабатываемая машиной, охватывает диапазон $\pm 30...35$ % от среднего значения.

Оптимальная энергонасыщенность бульдозера N/m . Отношение мощности установленного на машине двигателя к массе машины является обобщенным показателем машины по величине отношения основных технических параметров машины $N_{эН} = N/m$ (Вт/кг). Эта величина показывает, сколько единиц мощности приходится на единицу массы машины. Оптимальное значение показателя $N_{эН}$, см. рис. 5, устанавливается на основании минимизации математической модели продолжительности рабочего цикла бульдозера по зависимости (3.5), см. гл. 3, или по обобщенному показателю энергоемкости и материалоемкости $\Pi_{Nm} = Nm/\Gamma^2$, см. гл. 1. На основании анализа выражения

жениа $\frac{dt_u}{d(N/m)} = 0$ получают

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{опт} = k_{эН} \left(\frac{g^2 \cdot v_k \cdot l_n}{k_{уд.б} \cdot l_k \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг,} \quad (2.19)$$

где $k_{эH}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации и параметров машины, $k_{эH} = \left(\frac{k_{x.б}}{k_{пр.б}} \right)^{1/2}$. Для наиболее вероятных условий эксплуатации принимают $k_{эH} = 0,38$.

Величина $(N/m)_{опт}$ по условию минимизации обобщенного показателя удельных энергоемкости и материалоемкости $\Pi_{Nm} = Nm/\Gamma^2$ (см. гл. 1) может быть получена аналогично. Остальные обозначения даны выше.

Энергонасыщенность $N_{эH}$ является важным показателем эффективности работы бульдозера. Из рассмотренного выше следует, что при значении $(N/m)_{опт}$ машина в соответствующих условиях эксплуатации обеспечивает максимальную производительность Π_{max} и минимальную энергоемкость и материалоемкость по обобщенному показателю Π_{Nm} . Выбор машины из существующих на рынке или в парке предприятия для заданных условий эксплуатации следует осуществлять по машине с показателями m и (N/m) , ближайшими к оптимальным.

Минимальная продолжительность рабочего цикла бульдозера определяется подстановкой значения $m_{опт}$ в зависимость для определения времени цикла t_u .

$$t_{u \min} = k_{t \min} \left(\frac{k_{yд.б} \cdot I_k \cdot I_x \cdot k_{31}}{v_k} \right)^{1/2}, \text{ с}, \quad (2.20)$$

где $k_{t \min}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-сцепных параметров двигателя бульдозера и условий эксплуатации,

$$k_{t \min} = 2(k_{пр.б} \cdot k_{x.б})^{1/2}.$$

Величина $k_{t \min}$ изменяется в пределах 2,0...2,1. С увеличением дальности перемещения грунта бульдозером величина $k_{t \min}$ увеличивается. Для дальности перемещения грунта 40...50 м значение $k_{t \min}$ принимают 2,0.

Максимальная производительность бульдозера Π_{max} , имеющего оптимальную для данных условий работы массу $m_{опт}$, определяется на основании

$$\Pi_{max} = \frac{q}{t_u}.$$

После подстановки значения $t_{u \min}$ получают максимальную величину Π

$$\Pi_{max} = k_{\Pi} \cdot m \cdot \left(\frac{v_k \cdot I_k \cdot k_2^2 \cdot k_{31}}{k_{yд.б} \cdot I_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.21)$$

где $k_{\Gamma} = \frac{1}{k_{t\min}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Принимают $k_{\Gamma} = 0,5$.

Величину Γ_{\max} для предварительных расчетов можно устанавливать по формулам, рассмотренным в гл. 2.3.

По формуле (2.21) определяется наибольшая производительность бульдозера, когда обеспечивается минимальная продолжительность времени рабочего цикла $t_{ц\min}$.

Величина производительности бульдозеров зависит от прочности разрабатываемого грунта $k_{yд.б}$, технических и эксплуатационных параметров. При эксплуатационных расчетах производительность может быть определена по величине оптимальной массы $m_{опт}$ и значениям других параметров, см. гл. 2.3.

Грунт, который разрабатывается бульдозером с заданными параметрами наиболее эффективно, устанавливается по показателю удельное сопротивление копания отвалом $k_{yд.б}$. Искомая величина $k_{yд.б}$ определяется по формуле

$$k_{yд.б} \leq k_{\Gamma}^2 \cdot \frac{m^2 \cdot v_k \cdot l_k \cdot k_2^2 \cdot k_{31}}{\Gamma^2 \cdot l_x}, \text{ Н/м}^2. \quad (2.22)$$

Величина производительности Γ подставляется в формулы с размерностью м³/с. Анализ процесса разработки грунта рабочим органом землеройной машины методом минимизации рабочего цикла показывает, что с параметрами $m_{опт}$ и $(N/m)_{опт}$ машина эффективно разрабатывает грунт прочностью в пределах $\pm 30 \dots 35\%$ от расчетного значения, установленного по формуле (2.22).

Выбор бульдозера на этапе эксплуатационных расчетов осуществляется по показателям $m_{опт}$ и $(N/m)_{опт}$. Бульдозер с такими параметрами дает наибольшую производительность при наименьшей продолжительности рабочего цикла. Из существующих на рынке или в парке предприятия выбирают бульдозер с параметрами $m_{опт}$ и $(N/m)_{опт}$, ближайшими к оптимальным. При наличии нескольких машин с одинаковыми параметрами m и N/m расчет уточняется по цене машино-часа и цене единицы продукции C (руб./ч) и $C_{yд}$ (руб./м³).

Порядок выбора бульдозеров рассмотрен в гл. 2.4.

2.2.3. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров рыхлителя

Структурная модель рабочего цикла рыхлителей при выполнении рабочего процесса по челночной схеме имеет вид

$$t_{ц} = t_{ен} + k_{всп1} \cdot t_p + k_{всп2} \cdot t_x, \text{ с}, \quad (2.23)$$

Математическая модель продолжительности рабочего цикла рыхлителя на основании рассмотренного ранее (гл. 2.1) определяется зависимостью

$$t_u = \frac{k_{уд.р} \cdot k_{31} \cdot N \cdot l_p \cdot k_{вн.м}}{gmv_p} + \frac{g \cdot m \cdot l_x \cdot k_{х.р}}{N}, \text{ с.} \quad (2.24)$$

Первое слагаемое этого выражения определяет время на операцию внедрения зуба рыхлителя в грунт и операцию рыхления, второе – на операцию холостого хода рыхлителя – откат.

Выше приняты следующие обозначения:

$t_{вн}$ – время на операцию внедрения зуба рыхлителя в грунт, с;

t_p – время операции рыхления грунта, с;

$k_{всп1}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий время на выполнение дополнительных операций (позиционирование, разгон, торможение и т.п.), $k_{всп1} \leq 1,1$;

t_x – время на выполнение операции, не связанной непосредственно с рыхлением, – на операцию перемещения машины в первоначальное положение при челночной работе или на разворот машины для рыхления при движении в обратном направлении;

$k_{всп2}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий время на выполнение дополнительных операций (подъем рыхлителя в транспортное положение, разгон, торможение и т.п.), $k_{всп2} \leq 1,1$;

$$k_{вн.м} = \frac{k_{всп1} \cdot k_{m1} \cdot k_{вн}}{k_p} \text{ – безразмерный коэффициент, учитываю-}$$

щий увеличение времени на выполнение операции внедрения зуба в грунт и перемещение рыхлителя в процессе резания, $k_{вн.м} = 8...11$;

$$k_{хр} = \frac{k_{всп2} \cdot f_x}{k_x} \text{ – безразмерный коэффициент, зависящий от усло-}$$

вий эксплуатации при холостом движении рыхлителя, $k_{хр} = 0,3...0,36$;

k_{m1} – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение времени на перемещение машины при рыхлении, $k_{m1} = 5$;

$k_{вн}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение времени на внедрение зуба в грунт, $k_{вн} = 0,4...0,5$;

f_x – коэффициент сопротивления перемещению рыхлителя, $f_x = 0,1...0,2$;

Операция холостого хода рыхлителя протекает при скорости, не имеющей технологического ограничения, связанного с разрушением материала. Поэтому на скорость этой операции затрачивается вся мощность установленного двигателя, с учетом КПД трансмиссии и движителя.

Производительность рыхлителя определяется на основании (2.24) по формуле

$$\Pi_p = \frac{q_p}{\frac{k_{уд.p} \cdot k_{31} \cdot N \cdot l_p \cdot k_{вн.м}}{g \cdot m \cdot v_p} + \frac{g \cdot m \cdot l_x \cdot k_{хр}}{N}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.25)$$

Выше принимается $q_p = b_3 \cdot h_p \cdot n_3 \cdot l_p$ или $q_p = F_p \cdot n_3 \cdot l_p$ – объем грунта, разрыхленный за рабочий цикл. Величина $F_p \cdot n_3$ это площадь сечения прорези грунта, разрыхляемого за рабочий цикл машины. В гл.3 показано, что эта площадь пропорциональна мощности двигателя рыхлителя $F_p \cdot n_3 = k_{31} \cdot N$.

Остальные обозначения рассмотрены ранее.

Оптимальная масса рыхлителя $m_{опт}$. Анализ зависимостей (2.24) и (2.25) показывает, что наименьшее время цикла t_u и наибольшая производительность Π_p имеют место при определенной массе. Оптимальное значение $m_{опт}$ устанавливают на основании выражения $\frac{dt_u}{dm} = 0$.

$$m_{опт} = k_{m.p} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{уд.p} \cdot l_p \cdot k_{31}}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}, \quad (2.26)$$

или по формулам гл.3.

Здесь $k_{m.опт} = \left(\frac{k_{вн.м}}{k_{х.p}} \right)^{1/2}$ – безразмерный коэффициент, завися-

щий от условий эксплуатации и параметров машины. Величина $k_{m.опт}$ зависит от условий эксплуатации. Для наиболее вероятных условий работы принимают $k_{m.опт} = 5,3 \dots 5,5$.

График изменения оптимальной массы рыхлителя в зависимости от прочности грунта по показателю $k_{уд.p}$ и мощности установленного двигателя N приведен на рис. 6.

Оптимальная энергонасыщенность рыхлителя $(N/m)_{опт}$ устанавливается на основании минимизации математической модели продолжительности рабочего цикла рыхлителя по зависимости (3.6), см. гл. 3. или обобщенному показателю энергоемкости и материалоемкости $\Pi_{Nm} = Nm/\Pi^2$, см. гл. 1. На основании анализа выражения

$\frac{dt_u}{d(N/m)} = 0$ получают

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{опт} = k_{эн} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{уд.p} \cdot l_p \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}. \quad (2.27)$$

Здесь $k_{эН}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-цепных свойств двигателя и условий эксплуатации. Для расчетов принимают $k_{эН} = 0,18$.

Величина $(N/m)_{опт}$ по условию минимизации обобщенного показателя удельных энергоемкости и материалоемкости $\Pi_{Nm} = Nm/\Gamma^2$ (см. гл. 1) может быть получена аналогично. Остальные обозначения даны выше.

Анализ выражения для расчета $(N/m)_{опт}$ показывает, что энергонасыщенность рыхлителя возрастает с увеличением v_p и l_x и уменьшается с ростом прочности разрабатываемого грунта. Величина энергонасыщенности рыхлителя N/m существенно зависит от отношения дальностей перемещения машины в холостом и рабочем процессах l_x/l_p . С увеличением холостых пробегов N/m возрастает и наоборот. При $l_x/l_p \gg 1$ при выборе машины следует отдать предпочтение более энергонасыщенным машинам. При проектировании новых машин важно иметь в распоряжении полный анализ предполагаемых условий эксплуатации машины.

Минимальное время рабочего цикла рыхлителя определяется подстановкой значения $m_{опт}$ в зависимость для определения времени цикла t_u

$$t_u = k_{t\ min} \cdot \left(\frac{k_{y\partial.p} \cdot l_p \cdot l_x \cdot k_{31}}{v_p} \right)^{1/2}, \text{ с}, \quad (2.28)$$

Здесь $k_{t\ min}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-цепных параметров двигателя бульдозера и условий эксплуатации,

$$k_{t\ min} = 2(k_{вн.м} \cdot k_{х.р})^{1/2}.$$

Величина $k_{t\ min}$ в процессе эксплуатации изменяется. Для дальности перемещения грунта 40...50 м значение $k_{t\ min}$ принимают 3,2.

Максимальная производительность рыхлителя Π_{max} имеет место для машин с оптимальной для данных условий работы массой $m_{опт}$. На основании

$$\Pi_{max} = \frac{q_p}{t_u}$$

и после подстановки значения $t_{u\ min}$ получают максимальную величину Π

$$\Pi_{max} = k_{\Pi} \cdot N \cdot \left(\frac{v_p \cdot l_p \cdot k_{31}}{k_{y\partial.p} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.29)$$

Здесь $k_{\Pi} = \frac{1}{k_{t\ min}}$ – безразмерный коэффициент, для наиболее вероятных условий эксплуатации $k_{\Pi} = 0,31$.

При эксплуатационных расчетах производительность может быть определена по величине оптимальной массы m_{opt} и другим параметрам, см. гл. 2.3. Максимальную производительность дает рыхлитель, работающий в условиях, когда обеспечивается минимальная продолжительность рабочего цикла $t_{ц, min}$.

Грунт, который разрабатывается рыхлителем с заданными параметрами наиболее эффективно, определяется по показателю удельного сопротивления рыхлению $k_{уд.р}$. Величина $k_{уд.р}$ устанавливается по формуле

$$k_{уд.р} \leq k_{\Pi}^2 \cdot \frac{N^2 \cdot v_p \cdot l_p \cdot k_{31}}{\Pi^2 \cdot l_x}, \text{ Н/м}^2, \quad (2.30)$$

Величина Π подставляется в формулу в размерности м³/с. Для наиболее вероятных условий эксплуатации принимают $k_{\Pi} = 0,31$.

Выбор рыхлителя в заданных условиях эксплуатации из машин, имеющих в парке или на рынке техники. Показатели m_{opt} и $(N/m)_{opt}$ являются основными для выбора машины. Рыхлитель с параметрами m и N/m , ближайшими к оптимальным m_{opt} , $(N/m)_{opt}$, дает наибольший эффект по показателям удельных энергоемкости и материалоемкости в условиях, для которых определены расчетные величины. При наличии нескольких машин с одинаковыми параметрами m и N/m расчет уточняется по цене машино-часа и цене единицы продукции C (руб./ч) и $C_{уд}$ (руб./м³). Анализ процесса разработки грунта рабочим органом землеройной машины методом минимизации рабочего цикла показывает, что с параметрами m_{opt} и $(N/m)_{opt}$ машина работает с наибольшей эффективностью.

Порядок выбора машины рассмотрен в гл. 2.4.

2.2.4. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров бульдозера-рыхлителя

Математическая модель продолжительности рабочего цикла бульдозера с рыхлителем составляется на основании структурной модели рабочего цикла агрегата. Основным положением при составлении такой модели является условие, что агрегат выполняет на строительном объекте все операции по бульдозерным работам и все операции, связанные с рыхлением грунта, независимо от порядка выполнения этих операций. Структурная модель рабочего цикла бульдозера с оборудованием рыхлителя имеет вид:

$$t_{цбр} = t_{цб} + t_{цр}, \text{ с.} \quad (2.31)$$

На основании моделей структуры рабочего цикла бульдозера и рыхлителя получают

$$t_{цбр} = t_p + k_{бр} \cdot t_p + k_{хбр} \cdot t_{хб}, \text{ с.}$$

Математическая модель времени рабочего цикла агрегата бульдозер-рыхлитель на основании рассмотренных ранее положений

$$t_{цбр} = \frac{k_{уд.р} \cdot k_{з1} \cdot N \cdot l_p \cdot k_{вн.м} \cdot k_{бр}}{g \cdot m \cdot v_p} + \frac{g \cdot m \cdot l_{хб} \cdot k_{хб} \cdot k_{хбр}}{N}, \text{ с.} \quad (2.32)$$

Здесь первое слагаемое определяет время на выполнение рабочих операций рыхлителя и бульдозера, второе слагаемое характеризует время на выполнение операций холостого хода при бульдозерных и рыхлительных работах. Операция холостого хода рыхлителя протекает при скорости, не имеющей технологического ограничения, связанного с разрушением материала. Поэтому на скорость этой операции затрачивается вся мощность установленного двигателя, с учетом КПД трансмиссии и движителя.

Выше приняты следующие обозначения:

t_p – время операции рыхления грунта, с;

$k_{бр}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение времени рыхления на выполнение бульдозерных работ с разрыхленным грунтом;

$t_{хб}$ – время на выполнение операции холостого хода бульдозера;

$k_{хбр}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение времени на холостые перемещения при бульдозерных работах на выполнение холостых передвижений при рыхлении, $k_{хбр} = 2$. Остальные обозначения приведены выше.

Производительность агрегата бульдозер-рыхлитель определяется на основании $\Pi_{\max} = \frac{q_p}{t_{ц}}$ и значения $t_{ц}$, определяемого по формуле (2.32).

Оптимальная масса бульдозеро-рыхлительного агрегата $m_{опт}$ определяется на основании выражения $\frac{dt_{ц}}{dm} = 0$. Формула для расчета

$m_{опт}$ имеет вид

$$m_{опт} = k_{m\text{ опт}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{уд.р} \cdot l_p \cdot k_{з1}}{g^2 \cdot v_p \cdot l_{хб}} \right)^{1/2}, \text{ кг.} \quad (2.33)$$

Здесь $k_{m\text{ опт}} = \left(\frac{k_{вн.м} \cdot k_{бр}}{k_{хб} \cdot k_{хбр}} \right)^{1/2}$ – безразмерный коэффициент, для

наиболее вероятных условий эксплуатации принимают $k_{m\text{ опт}} = 6 \dots 7$.

Для предварительных расчетов величину $m_{опт}$ можно определять по формулам рассмотренным в гл. 2.3.

При этом значении массы машина в заданных условиях эксплуатации обеспечивает выполнение технологических работ при макси-

мальной производительности с минимальными энергетическими и материальными затратами по показателям Π , $N_{y\partial}$ и $m_{y\partial}$.

Оптимальная энергонасыщенность агрегата $(N/m)_{opt}$ устанавливается на основании минимизации математической модели продолжительности рабочего цикла бульдозера-рыхлителя по зависимости (3.7), см. гл. 3, или обобщенному показателю энергоемкости и материалоемкости $\Pi_{Nm} = Nm/\Pi^2$, см. гл. 1. На основании анализа выражения $\frac{dt_{\zeta}}{d(N/m)} = 0$ получают

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{opt} = k_{\text{ЭН}} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{y\partial.p} \cdot l_p \cdot k_{31}}\right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.} \quad (2.34)$$

Для предварительных расчетов величину $(N/m)_{opt}$ можно определять по зависимостям рассмотренным в гл. 2.3.

Выше принято $k_{\text{ЭН}} = 1/k_{m.opt}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-сцепных свойств движителя и условий эксплуатации. Для наиболее вероятных условий работы следует принимать $k_{\text{ЭН}} = 0,27$.

Минимальное время рабочего цикла агрегата определяется подстановкой значения m_{opt} в зависимость для определения времени цикла t_{ζ} .

$$t_{\zeta} = k_{t\ min} \cdot \left(\frac{k_{y\partial.p} \cdot l_p \cdot l_{x\delta} \cdot k_{31}}{v_p}\right)^{1/2}, \text{ с.} \quad (2.35)$$

Выше принято $k_{t\ min}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-сцепных параметров движителя бульдозера и условий эксплуатации

$$k_{t\ min} = 2(k_{\text{вн.м}} \cdot k_{\text{бп}} \cdot k_{x\delta} \cdot k_{x\text{бп}})^{1/2}.$$

Для наиболее вероятных условий работы принимают $k_{t\ min} = 7 \dots 8$.

Полученные зависимости показывают, что величины оптимальных массы агрегата m_{opt} и его энергонасыщенности $(N/m)_{opt}$ зависят от прочностных свойств разрабатываемого грунта и ряда других технико-эксплуатационных параметров.

Максимальная производительность бульдозерно-рыхлительного агрегата Π_{max} при выполнении бульдозерных и рыхлительных работ определяется путем подстановки в формулу $\Pi_{max} = q/t_{\zeta}$ величины $t_{\zeta\ min}$.

$$\Pi_{max} = k_{\Pi} \cdot N \cdot \left(\frac{v_p \cdot l_p \cdot k_{31}}{k_{y\partial.p} \cdot l_{x\delta}}\right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (2.36)$$

Здесь $k_{\Pi} = \frac{1}{k_{t\ min}}$ – безразмерный коэффициент, для наиболее

вероятных условий эксплуатации $k_{\Gamma} = 0,125$. Для предварительных расчетов величину Π_{max} можно определять по формулам, рассмотренным в гл. 2.3. Максимальную производительность, определяемую по формуле (2.36), дает машина, работающая в условиях, когда обеспечивается минимальная продолжительность рабочего цикла $t_{ц min}$.

Выбор агрегата осуществляется, как рассмотрено выше для других землеройных машин, по величине показателей m_{opt} и $(N/m)_{opt}$. Из имеющихся машин выбирают агрегат с величинами m и N/m , ближайшими к расчетным. При наличии нескольких машин с одинаковыми параметрами m и N/m расчет уточняется по цене машино-часа и цене единицы продукции C (руб./ч) и C_{yd} (руб./м³). Ряд других зависимостей даны в гл. 2.3.

Порядок выбора машины рассмотрен в гл. 2.4.

2.2.5. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров скрепера

Математическая модель продолжительности рабочего цикла скрепера устанавливают на основе анализа структурной модели рабочего цикла. Скрепер является мобильной землеройно-транспортной машиной. Структурную модель рабочего цикла скрепера представляют в виде суммы времени выполнения основных рабочих операций машины

$$t_{ц} = t_{оп} + t_k + t_{пд} + t_{мп} + t_e + t_x, \text{ с}, \quad (2.37)$$

где $t_{оп}$ – время на выполнение операции опускания рабочего органа скрепера – ковша, с;

t_k – время на выполнение операции отделения грунта от массива (копание), с;

$t_{пд}$ – время операции подъема рабочего органа (ковша) с грунтом, с;

$t_{мп}$ – время на операцию транспортировки грунта к месту локализации, с;

t_e – время на выполнение операции разгрузки ковша, с;

t_x – время на операцию возвращения скрепера в забой, с.

Ряд операций совмещаются. Опускание ковша совмещается с заглублением ковша в грунт, подъем ковша – с транспортировкой и выгрузкой грунта из ковша. В структуре оставляют основные операции, другие учитываются соответствующими коэффициентами. Получают

$$t_{ц} = k_{всп1} \cdot t_k + k_{всп2} \cdot t_{мп} + k_{всп3} \cdot t_x, \text{ с}, \quad (2.38)$$

где $k_{всп1}$, $k_{всп2}$, $k_{всп3}$ – безразмерные коэффициенты, учитывающие время на выполнение вспомогательных операций: подъем, опускание, выгрузка ковша, позиционирование, разгон, торможение и другие вспомогательные операции, $k_{всп} = 1,1$.

Время основных операций t_k , $t_{мп}$, t_x выражается математическими моделями, рассмотренными в главе 1. В целях получения модели бо-

лее удобной для последующего анализа объединяют ряд слагаемых, имеющих в структуре параметры скорости с технологическими ограничениями $v_p \leq 1 \dots 2$ м/с (копание, опускание и подъем ковша и др.). Соответствующее объединение учитывается безразмерными коэффициентами влияния

$$t_{\text{ц}} = \frac{k_{\text{уд.к}} \cdot q_c \cdot k_{\text{р.мп1}}}{g \cdot m \cdot v_p} + \frac{g \cdot m \cdot l_x \cdot k_{\text{с.х}}}{N}, \text{ с.} \quad (2.39)$$

Здесь первое слагаемое определяет время на выполнение рабочих операций копания и последующей транспортировки грунта с учетом операций опускания, подъема и выгрузки ковша, второе слагаемое характеризует время на выполнение операции холостого движения скрепера к забою.

Выше приняты следующие обозначения:

$$k_{\text{р.мп1}} = \frac{k_{\text{всп1}} \cdot k_{\text{мп}} \cdot k_{\text{с}}}{k_{\text{к}}} - \text{безразмерный коэффициент, учитываю-}$$

щий увеличение времени операции копания на выполнение операции перемещения грунта скрепером. Для наиболее вероятных условий эксплуатации принимают $k_{\text{р.мп1}} = 43 \dots 44$.

$$k_{\text{сх}} = \frac{k_{\text{всп3}} \cdot f_x}{k_x} - \text{безразмерный коэффициент, учитывающий влия-}$$

ние тягово-цепных характеристик движителя. Принимают $k_{\text{сх}} = 0,3$.

$k_{\text{уд.к}}$ – удельное сопротивление копанью грунта ковшом скрепера, Н/м², см. табл. 3.4;

v_p – рабочая скорость скрепера при выполнении технологических операций, м/с;

q_c – вместимость ковша скрепера, м³, $q_c = b_c \cdot h_{\text{ср}} \cdot l_k$;

b_c – ширина ковша скрепера, м;

$h_{\text{ср}}$ – средняя глубина копания, м;

l_k – длина ковша скрепера, м;

$k_{\text{с}}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение времени продолжительности операции копания на передвижение самой машины при копании, $k_{\text{с}} = 1,2$;

$k_{\text{мп}}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий время на транспортировку ковша с грунтом, $k_{\text{мп}} = 10 \dots 11$.

Остальные обозначения приведены ранее.

Производительность скрепера может быть установлена путем подстановки зависимости для определения рабочего цикла скрепера (2.39) в формулу для определения производительности $\Pi = q_c/t_{\text{ц}}$

$$\Pi = \frac{q_c}{\frac{k_{уд.к} \cdot q_c \cdot k_{р.мп1}}{g \cdot m \cdot v_p} + \frac{g \cdot m \cdot l_x \cdot k_{сх}}{N}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.40)$$

Анализ выражений по определению времени цикла (2.39) и производительности (2.40) показывает, что эти величины зависят существенным образом от массы машины и, следовательно, от тягово-сцепных характеристик машины. Минимальное время рабочего цикла скрепера и максимальная производительность в определенных условиях эксплуатации имеют место при определенном оптимальном значении массы машины.

График функции $t_u = f(m, N)$, приведенный на рис. 7, иллюстрирует это положение.

Оптимальная масса скрепера $m_{опт}$ определяется на основании выражения $\frac{dt_u}{dm} = 0$. Формула для расчета $m_{опт}$ имеет вид

$$m_{опт} = k_{m_{опт}} \cdot \left(\frac{k_{уд.к} \cdot q_c \cdot N}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}, \quad (2.41)$$

Для предварительных расчетов величину $m_{опт}$ целесообразно рассчитывать по более общей зависимости (3.9), см. гл. 2.3.

Здесь $k_{m_{опт}} = \left(\frac{k_{р.мп1}}{k_{сх}} \right)^{1/2}$ – безразмерный коэффициент, завися-

щий от условий эксплуатации и параметров машины. Для наиболее вероятных условий эксплуатации можно принимать $k_{m_{опт}} = 12$. Масса скрепера увеличивается с ростом прочности разрабатываемого грунта $k_{уд.к}$, мощности двигателя N и вместимости ковша q_c и уменьшается с увеличением холостых пробегов l_x .

Оптимальная энергонасыщенность скрепера $(N/m)_{опт}$ устанавливается на основании минимизации математической модели продолжительности рабочего цикла скрепера по зависимости (3.2), см. гл. 3. или обобщенному показателю энергоемкости и материалоемкости $\Pi_{Nm} = Nm/\Gamma^2$, см. гл. 1.

На основании анализа выражения $\frac{dt_u}{d(N/m)} = 0$ получают

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{опт} = k_{эН} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{уд.к} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}. \quad (2.42)$$

Здесь $k_{эH} = \frac{k_{сx}}{k_{p.mp1}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от

тягово-цепных свойств двигателя и условий эксплуатации. Для наиболее вероятных условий работы следует принимать $k_{эH} = 0,08$.

Энергонасыщенность скрепера $N_{эH}$ увеличивается с ростом скорости машины v и уменьшается с ростом прочности грунта. Энергонасыщенность $(N/m)_{опт}$ увеличивается с ростом дальности холостых перемещений скрепера.

Минимальное время рабочего цикла скрепера определяется подстановкой значения $m_{опт}$ в зависимость для определения времени цикла $t_{ц}$.

$$t_{ц} = k_{t\ min} \left(\frac{k_{уд.к} \cdot l_x}{v_p \cdot k_3} \right)^{1/2}, \text{ с.} \quad (2.43)$$

Здесь $k_{t\ min}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-цепных параметров двигателя скрепера и условий эксплуатации,

$$k_{t\ min} = 2(k_{p.mp1} \cdot k_{сx})^{1/2}.$$

Для наиболее вероятных условий работы принимают $k_{t\ min} = 7,2$.

Максимальная производительность скрепера Π_{max} определяется на основании соотношения $\Pi_{max} = q_c/t_{ц}$ и величины $t_{ц\ min}$

$$\Pi_{max} = k_{\Pi} \cdot q_c \cdot \left(\frac{v_p \cdot k_3}{k_{уд.к} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.44)$$

где $k_{\Pi} = \frac{1}{k_{t\ min}}$ – безразмерный коэффициент, для наиболее вероятных

условий эксплуатации $k_{\Pi} = 0,14$. Максимальную производительность, определяемую по этой формуле, дает машина, работающая в условиях, когда обеспечивается минимальная продолжительность рабочего цикла $t_{ц\ min}$.

Выбор скрепера осуществляется по величине показателей $m_{опт}$ и $(N/m)_{опт}$. Из имеющихся машин выбирают скрепер с величинами m и N/m , ближайшими к оптимальным. При наличии нескольких машин с одинаковыми параметрами m и N/m расчет уточняется по цене машино-часа и цене единицы продукции C (руб./ч) и $C_{уд}$ (руб./м³). С этими параметрами, как следует из рассмотренных положений, скрепер обеспечивает максимальную производительность при минимальных удельных энергоёмкости и материалоемкости.

На основании полученных соотношений и методов рассмотренных в гл. 2.3, могут быть установлены другие технические и эксплуатационные параметры.

Порядок выбора машины рассмотрен в гл. 2.4.

2.2.6. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров автогрейдеров

Теоретическую модель продолжительности рабочего цикла автогрейдера устанавливают на основе анализа структурной модели рабочего цикла автогрейдера как циклической землеройно-транспортной машины. Основными операциями автогрейдера являются: резание грунта и планировочные работы. Перемещение автогрейдера от одного рабочего участка к другому осуществляется автономно и может рассматриваться в качестве нерабочего холостого перемещения машины. Структурную модель рабочего цикла автогрейдера представляют в виде суммы времени выполнения основных рабочих операций машины

$$t_{\text{ц}} = k_{\text{всп1}} \cdot t_{\text{к}} + k_{\text{всп2}} \cdot t_{\text{пл}} + k_{\text{всп3}} \cdot t_{\text{х}}, \text{ с}, \quad (2.45)$$

где $k_{\text{всп1}}$, $k_{\text{всп2}}$, $k_{\text{всп3}}$ – безразмерные коэффициенты, учитывающие время на выполнение вспомогательных операций: подъем, опускание, выгрузку ковша, позиционирование, разгон, торможение и другие вспомогательные операции;

$t_{\text{к}}$ – время на выполнение операции отделения грунта от массива (копание) отвалом автогрейдера, с;

$t_{\text{пл}}$ – время на планировочные работы, с;

$t_{\text{х}}$ – время на перемещение автогрейдера вне рабочего состояния, с.

Математическая модель продолжительности рабочего цикла автогрейдера. Время основных операций $t_{\text{к}}$, $t_{\text{пл}}$, $t_{\text{х}}$ выражается математическими моделями, рассмотренными в гл. 2.1. Объединяя слагаемые, имеющие технологические ограничения по скорости операций $v_{\text{к}} \leq 1,5$ м/с (копание), $v_{\text{пл}} \leq 1,5$ м/с (планировка) и безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние объединенных слагаемых, получают

$$t_{\text{ц}} = \frac{k_{\text{уд.а}} \cdot k_{31} \cdot N \cdot l_{\text{р}} \cdot k_{\text{р.пл}}}{m \cdot g \cdot v_{\text{р}}} + \frac{m \cdot g \cdot l_{\text{х}} \cdot k_{\text{ха}}}{N}, \text{ с}. \quad (2.46)$$

В этом выражении первое слагаемое определяет продолжительность выполнения рабочих операций вырезания и планировки грунта, второе слагаемое характеризует время на выполнение нерабочих холостых перемещений автогрейдера.

Выше приняты следующие обозначения:

$$k_{\text{р.пл}} = \frac{k_{\text{всп1}} \cdot k_{\text{а}} \cdot k_{\text{пл.з}}}{k_{\text{р}}} \text{ – безразмерный коэффициент, зависящий}$$

от условий эксплуатации, $k_{\text{р.пл}} = 4 \dots 5$, принимают $k_{\text{р.пл}} = 4,9$;

$$k_{\text{ха}} = \frac{k_{\text{всп3}} \cdot f_{\text{х}}}{k_{\text{х}}} \text{ – безразмерный коэффициент, учитывающий влия-}$$

ние тягово-цепных характеристик движителя, для наиболее вероятных условий эксплуатации принимают $k_{\text{ха}} = 0,25 \dots 0,3$;

v_p – рабочая скорость автогрейдера при выполнении технологических операций (резание и планировка), м/с;

$k_{yд.а}$ – удельное сопротивление копанию грунта отвалом автогрейдера, Н/м², см. табл.1.1.

$F_a = B_a \cdot h_{ср} \cdot k_{ра}$ – поперечное сечение вырезаемой отвалом стружки грунта, м²;

B_a – длина отвала автогрейдера, м;

$h_{ср}$ – средняя глубина резания, м;

$k_{ра}$ – коэффициент длины отвала, контактирующего с грунтом при резании, $k_{ра} \leq 0,5$;

k_a – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение времени на перемещение самого автогрейдера при копании, $k_a = 1,2$;

$k_{пл.з}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение времени на планировочные работы, $k_{пл.з} = 1,1 \dots 1,2$.

Площадь поперечного сечения вырезаемой отвалом стружки грунта $F_a = B_a \cdot h_{ср} \cdot k_{ра}$ пропорциональна мощности двигателя машины,

$$F_a = k_{31} \cdot N, \text{ м}^2.$$

Остальные обозначения даны ранее.

Производительность автогрейдера определяется на основании соотношения $\Pi = q_a/t_u$ и формулы (2.46)

$$\Pi = \frac{q_a}{\frac{k_{yд.а} \cdot N \cdot k_{31} \cdot l_p \cdot k_{р.пл}}{g \cdot m \cdot v_p} + \frac{g \cdot m \cdot l_x \cdot k_{ха}}{N}}, \text{ м}^3/\text{с}, \text{ м}^2/\text{с}, \text{ м}/\text{с}, \quad (2.47)$$

где q_a – количество полезного продукта, вырабатываемого автогрейдером за рабочий цикл машины и измеряемого в погонных метрах, м² или м³.

Оптимальная масса автогрейдера $m_{опт}$ определяется на основании выражения $\frac{dt_u}{dm} = 0$. Формула для расчета $m_{опт}$ имеет вид:

$$m_{опт} = k_{m.опт} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{yд.а} \cdot l_p \cdot k_{31}}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}. \quad (2.48)$$

Здесь $k_{m.опт} = \left(\frac{k_{р.пл}}{k_{ха}} \right)^{1/2}$ – безразмерный коэффициент, завися-

щий от условий эксплуатации и параметров машины. Для наиболее вероятных условий эксплуатации можно принимать $k_{m.опт} = 4$.

Оптимальная энергонасыщенность автогрейдера $(N/m)_{опт}$ определяется на основании минимизации математической модели продолжительности рабочего цикла автогрейдера по зависимости (3.8), см. гл. 3, или обобщенному показателю энергоемкости и материало-

емкости $\Pi_{Nm} = Nm/\Pi^2$, см. гл. 1. На основании анализа выражения $\frac{dt_u}{d(N/m)} = 0$ получают

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{opt} = k_{эН} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{уд.а} \cdot l_p \cdot k_{31}}\right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}, \quad (2.49)$$

здесь $k_{эН} = \frac{k_{ха}}{k_{р.пл}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тя-

гово-сцепных свойств движителя и условий эксплуатации. Для наиболее вероятных условий работы следует принимать $k_{эН} = 0,25$.

Анализ выражения (2.49) показывает, что энергонасыщенность автогрейдера $N_{эН}$ увеличивается с ростом v машины и уменьшается с ростом прочности грунта. Существенное влияние на энергонасыщенность автогрейдера оказывает отношение длины холостого хода к рабочему l_x/l_p . С ростом соотношения следует выбирать машину с большей энергонасыщенностью N/m .

Минимальное время рабочего цикла автогрейдера определяется подстановкой значения m_{opt} в зависимость для определения времени цикла t_u .

$$t_u = k_{t\ min} \left(\frac{k_{уд.а} \cdot l_p \cdot l_x \cdot k_{31}}{v_p}\right)^{1/2}, \text{ с}. \quad (2.50)$$

Здесь $k_{t\ min}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации,

$$k_{t\ min} = 2(k_{р.пл} \cdot k_{ха})^{1/2}.$$

Для наиболее вероятных условий работы автогрейдера принимают $k_{t\ min} = 2,44$.

Для предварительных расчетов величину t_u можно рассчитывать по зависимостям приведенным в гл. 2.3.

Максимальная производительность автогрейдера Π_{max} определяется на основании соотношения $\Pi_{max} = q_a/t_u$ и величины $t_{u\ min}$. В зависимости от единицы измерения полезного продукта максимальная производительность рассчитывается по формуле

$$\Pi_{max} = k_{\Pi} \left(\frac{v_p \cdot l_p}{k_{уд.а} \cdot l_x \cdot k_{31}}\right)^{1/2}, \text{ пог. м/с}. \quad (2.51)$$

Величину Π_{max} , для предварительных расчетов, можно рассчитывать по зависимостям рассмотренным в гл. 2.3.

$$\Pi_{max} = k_{\Pi} \left(\frac{N \cdot B_o \cdot l_p \cdot v_p}{k_{уд.а} \cdot h_{ср} \cdot l_x}\right)^{1/2}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (2.52)$$

$$P_{max} = k_{\Gamma} \left(\frac{N \cdot F_H^2 \cdot l_p \cdot v_p}{k_{y\delta.a} \cdot F_a \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.53)$$

где $k_{\Gamma} = \frac{1}{k_{tmin}}$ – безразмерный коэффициент, для наиболее вероятных

условий эксплуатации $k_{\Gamma} = 0,5$;

F_H – площадь поперечного сечения насыпи, м^2 ;

B_o – длина (ширина) отвала, м;

h_{cp} – средняя глубина резания, м.

Максимальную производительность, определяемую по этой формуле, имеет машина, работающая в условиях, когда обеспечивается минимальная продолжительность рабочего цикла $t_{u min}$.

Выбор автогрейдера для заданных условий эксплуатации осуществляется по величине показателей m_{opt} и $(N/m)_{opt}$. Из имеющихся машин выбирают автогрейдер с параметрами m и N/m , ближайшими к расчетным. Машина с такими параметрами обеспечивает выполнение работ с максимальной производительностью и минимальными удельными показателями энерго- и материалоемкости в грунтах с расчетной прочностью $k_{y\delta.a}$. При наличии нескольких машин с одинаковыми параметрами m и N/m расчет уточняется по цене машино-часа и цене единицы продукции C (руб./ч) и $C_{y\delta}$ (руб./ м^3). На основании полученных соотношений могут быть установлены другие технические и эксплуатационные параметры: мощность N , размеры отвала B_a , прочностные характеристики грунта по показателю $k_{y\delta.a}$ и др. Зависимости для определения ряда параметров приведены в гл. 2.3.

Порядок выбора машины рассмотрен в гл. 2.4.

2.2.7. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров одноковшовых погрузчиков

Математическая модель продолжительности рабочего цикла одноковшового погрузчика устанавливают на основе анализа структурной модели рабочего цикла. Структурную модель представляют в виде суммы времени выполнения основных рабочих операций машины

$$t_u = k_{всп1} \cdot t_3 + t_{п\delta} + k_{всп2} \cdot t_{mp} + k_{всп3} \cdot t_x, \text{ с}, \quad (2.54)$$

где t_3 – время на выполнение операции захвата (зачерпывания) материала, с;

$t_{п\delta}$ – время операции подъема рабочего органа (ковша), с;

t_{mp} – время на операцию транспортировки материала, с;

t_x – время на операцию возвращения погрузчика в исходное состояние, холостой ход, с;

$k_{всп1}$, $k_{всп2}$, $k_{всп3}$ – безразмерные коэффициенты, учитывающие время на выполнение вспомогательных операций: подъем, опускание,

выгрузка ковша, позиционирование, разгон, торможение и другие вспомогательные операции.

Математическая модель продолжительности рабочего цикла одноковшового погрузчика. Время основных операций $t_3, t_{пд}, t_{мп}, t_x$ выражается математическими моделями, рассмотренными в гл. 2.1. В целях получения модели более удобной для последующего анализа объединяют ряд слагаемых, имеющих в структуре параметры скорости с технологическими ограничениями $v_p \leq 1,5$ м/с (копание, опускание и подъем ковша и др.). Безразмерные коэффициенты, учитывают влияние такого объединения

$$t_u = \frac{k_{уд.п} \cdot q_n \cdot k_{з.мп}}{m \cdot g \cdot v_p} + \frac{m \cdot g \cdot l_x \cdot k_{хп}}{N}, \text{ с.} \quad (2.55)$$

Здесь первое слагаемое определяет время на выполнение рабочих операций захвата груза, подъема, перемещения груза, опускания и выгрузки ковша, второе слагаемое характеризует время на выполнение операций холостого передвижения погрузчика.

Выше приняты следующие обозначения:

$k_{уд.п}$ – удельное сопротивление захвата материала ковшом погрузчика, Н/м², см. табл. 1.1;

$k_{з.мп} = \frac{k_{всп1} \cdot k_n \cdot k_{пр}}{k_3}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение времени на операции: захвата материала, перемещения. Принимают $k_{з.мп} = 7$;

$k_{хп} = \frac{k_{всп3} \cdot f_x}{k_x}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние тягово-цепных характеристик движителя, принимают $k_{хп} = 0,36$;

k_n – коэффициент, учитывающий увеличение времени на перемещение погрузчика при захвате материала, $k_n = 2$;

$k_{пр}$ – коэффициент, учитывающий увеличение времени на перемещение материала погрузчиком при транспортировке, $k_{пр} = 1,3 \dots 2$;

v_p – рабочая скорость скрепера при выполнении технологических операций, м/с;

q_n – вместимость ковша погрузчика, м³, $q_n = b_n \cdot h_{ср} \cdot l_k$;

b_n – ширина ковша погрузчика, м;

$h_{ср}$ – средняя глубина копания, м;

l_k – длина ковша погрузчика, м.

Остальные обозначения рассмотрены ранее.

Производительность одноковшового погрузчика устанавливается на основании зависимости для определения времени рабочего цикла погрузчика (2.55) и формулы для определения производительности $\Pi = q_n/t_u$

$$\Pi = \frac{q_p}{\frac{k_{уд.п} \cdot q_p \cdot k_{з.мп}}{g \cdot m \cdot v_p} + \frac{g \cdot m \cdot l_x \cdot k_{хп}}{N}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.56)$$

Анализ выражений по определению времени цикла (2.55) и производительности (2.56) показывает, что эти величины зависят существенным образом от массы машины и, следовательно, от тягово-сцепных характеристик машины. Минимальное время рабочего цикла погрузчика и максимальная производительность в определенных условиях эксплуатации имеют место при определенном оптимальном значении массы машины.

Характер изменения t_u от влияющих факторов в различных условиях изменения технических параметров погрузчика иллюстрирует график рис. 8.

Оптимальная масса одноковшового погрузчика $m_{опт}$ определяется на основании выражения $dt_u/dm = 0$. Формула для расчета $m_{опт}$ имеет вид:

$$m_{опт} = k_{m.опт} \left(\frac{k_{уд.п} \cdot q_p \cdot N}{g^2 v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}, \quad (2.57)$$

Здесь $k_{m.опт} = \left(\frac{k_{з.мп}}{k_{хп}} \right)^{1/2}$ – безразмерный коэффициент, завися-

щий от условий эксплуатации и параметров машины. Для наиболее вероятных условий эксплуатации можно принимать $k_{m.опт} = 4,4$.

Оптимальная энергонасыщенность одноковшового погрузчика $(N/m)_{опт}$ устанавливается на основании минимизации математической модели продолжительности рабочего цикла одноковшового погрузчика по зависимости (3.3), см. гл. 3, или обобщенному показателю энергоемкости и материалоемкости $\Pi_{Nm} = Nm/\Pi^2$, см. гл. 1. На основании

анализа выражения $\frac{dt_u}{d(N/m)} = 0$ получают

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{опт} = k_{эн} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{уд.п} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}. \quad (2.58)$$

Здесь $k_{эн} = \frac{k_{хп}}{k_{з.мп}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от

тягово-сцепных свойств двигателя и условий эксплуатации. Для наиболее вероятных условий работы следует принимать $k_{эн} = 0,23$.

Энергонасыщенность погрузчика $N_{эн}$ увеличивается с ростом скорости машины v и уменьшается с ростом прочности материала и

вместимости ковша. Энергонасыщенность $(N/m)_{опт}$ увеличивается с ростом дальности холостых перемещений погрузчика.

Минимальная продолжительность рабочего цикла погрузчика определяется подстановкой значения $m_{опт}$ в зависимость для определения времени цикла t_u .

$$t_u = k_{t \min} \left(\frac{k_{уд.п} \cdot l_x}{v_p \cdot k_3} \right)^{1/2}, \text{ с.} \quad (2.59)$$

Здесь $k_{t \min}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-цепных параметров движителя скрепера и условий эксплуатации,

$$k_{t \min} = 2(k_{з.пр} \cdot k_{хп})^{1/2}.$$

Для наиболее вероятных условий работы принимают

$$k_{t \min} = 3,1 \dots 3,2.$$

Максимальная производительность погрузчика Π_{max} определяется на основании соотношения $\Pi_{max} = q_n/t_u$ и величины $t_{u \min}$.

$$\Pi_{max} = k_{п} \cdot q_n \cdot \left(\frac{v_p \cdot k_3}{k_{уд.п} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (2.60)$$

Здесь $k_{п} = \frac{1}{k_{t \min}}$ – безразмерный коэффициент для наиболее ве-

роятных условий эксплуатации $k_{п} = 0,31$.

Для предварительных расчетов величину Π_{max} погрузчиков можно определить по зависимостям, рассмотренным в гл. 2.3.

Формула (2.60) дает максимальную производительность погрузчика. Такую производительность обеспечивает погрузчик в условиях работы с минимальной продолжительностью рабочего цикла $t_{u \min}$.

Выбор одноковшового погрузчика осуществляется по величине показателей $m_{опт}$ и $(N/m)_{опт}$. Из имеющихся машин выбирают погрузчик с параметрами m и N/m , ближайшими к оптимальным $m_{опт}$, $(N/m)_{опт}$. При наличии нескольких машин с одинаковыми параметрами m и N/m расчет уточняется по цене машино-часа и цене единицы продукции C (руб./ч) и $C_{уд}$ (руб./м³). С этими параметрами, как следует из рассмотренных положений, погрузчик обеспечивает максимальную производительность при минимальных удельных энерго- и материалоемкости. Порядок выбора машины рассмотрен в гл. 2.4.

На основании полученных соотношений могут быть установлены другие технические и эксплуатационные параметры мощность N , вместимость ковша q_n , прочностные характеристики грунта по показателю $k_{уд.п}$ и др. Зависимости для определения ряда параметров приведены в гл. 2.3.

2.2.8. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров экскаватора-погрузчика.

Многоцелевые машины такого типа широко используются в стесненных условиях проведения строительных работ. Машина является многоцелевым агрегатом циклического действия. Цикл работ по копанию грунта экскаватором чередуется с циклом выполнения погрузочных работ с насыпным грунтом и другими операциями.

Математическую модель продолжительности рабочего цикла экскаватора-погрузчика устанавливают на основе анализа структурной модели рабочего цикла. Агрегат выполняет на объекте строительства весь комплекс операций, связанных с экскавацией грунта и погрузочно-разгрузочными работами независимо от очередности выполнения соответствующих технологических работ. Структурная модель рабочего цикла экскаватора-погрузчика имеет вид

$$t_{цэп} = k_n \cdot t_{цэ} + t_{хп}, \text{ с}, \quad (2.61)$$

где $t_{цэ}$ – время рабочего цикла экскаватора, с;

$t_{хп}$ – время операции холостого хода погрузчика, с;

k_n – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение времени $t_{цэ}$ на выполнение рабочих операций погрузчика: захват груза, перемещение, подъем, опускание, выгрузку ковша, позиционирование, разгон, торможение и другие вспомогательные операции.

Время основных операций экскаватора и погрузчика выражается математическими моделями, рассмотренными в гл. 2.1. В целях получения модели более удобной для последующего анализа объединяют ряд слагаемых, имеющих в структуре параметры скорости с технологическими ограничениями $v_p \leq 1,5$ м/с (копание, опускание и подъем ковша и др.).

$$t_{цэп} = \frac{k_{уд.э} \cdot q_э \cdot k_{эп}}{m \cdot g \cdot v_k} + \frac{m \cdot g \cdot l_x \cdot k_{хп}}{N}, \text{ с}. \quad (2.62)$$

Здесь первое слагаемое определяет время на выполнение всего объема экскаваторных работ и рабочих операций погрузчика (кроме операции холостого хода), второе слагаемое характеризует время на выполнение операций холостых перемещений экскаватора-погрузчика.

Выше приняты следующие обозначения:

$$k_{эп} = \frac{k_э \cdot k_n}{k_m} \text{ – безразмерный коэффициент, зависящий от усло-}$$

вий эксплуатации и учитывающий увеличение времени операции копания ковшем экскаватора на операции цикла погрузчика, для расчета принимают $k_{эп} = 7$;

$k_э$ – безразмерный коэффициент, учитывающий операции, производимые экскаватором, кроме операции копания, $k_э = 2,5$;

k_n – безразмерный коэффициент, учитывающий операции погрузчика, кроме операции холостого хода, $k_n = 2,0$;

k_m – коэффициент распределения массы экскаватора на кромку ковша, $k_m = 0,8$;

$k_{хп} = \frac{f_x \cdot k_{вспз}}{k_x}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от ус-

ловий эксплуатации на этапе холостого перемещения агрегата или при погрузочно-разгрузочных работах, $k_{хп} = 0,36$.

Другие обозначения рассмотрены ранее.

Производительность экскаватора-погрузчика при выполнении всего объема экскаваторных и погрузочных работ на основании $\Pi = q_{\text{э}}/t_{\text{ц}}$ и зависимости $t_{\text{цэп}}$ определяется по формуле

$$\Pi = \frac{q_{\text{э}}}{\frac{k_{\text{уд.э}} \cdot q_{\text{э}} \cdot k_{\text{эп}}}{m \cdot g \cdot v_{\text{к}}} + \frac{m \cdot g \cdot l_x \cdot k_{\text{хп}}}{N}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.63)$$

Оптимальная масса экскаватора-погрузчика $m_{\text{опт}}$ определяется на основании выражения $\frac{dt_{\text{цэп}}}{dm} = 0$. Формула для расчета $m_{\text{опт}}$ имеет вид:

$$m_{\text{опт}} = k_{m \text{ опт}} \cdot q_{\text{э}} \cdot \left(\frac{k_{\text{уд.э}} \cdot k_3}{g^2 \cdot v_{\text{к}} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}. \quad (2.64)$$

Здесь $k_{m \text{ опт}} = \left(\frac{k_{\text{эп}}}{k_{\text{хп}}} \right)^{1/2}$ – безразмерный коэффициент, зависящий

от условий эксплуатации и параметров машины. Для наиболее вероятных условий эксплуатации можно принимать $k_{m \text{ опт}} = 4,4$. Величину $m_{\text{опт}}$ экскаватора-погрузчика для предварительных расчетов можно определять по зависимостям рассмотренным в гл. 2.3.

Оптимальная энергонасыщенность экскаватора-погрузчика $(N/m)_{\text{опт}}$ устанавливается на основании минимизации математической модели продолжительности рабочего цикла одноковшового погрузчика по зависимости (3.3), см. гл.3. или обобщенному показателю энергоемкости и материалоемкости $\Pi_{Nm} = Nm/\Pi^2$, см. гл. 1. На основании

анализа выражения $\frac{dt_{\text{ц}}}{d(N/m)} = 0$ получают

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{\text{опт}} = k_{\text{эп}} \left(\frac{g^2 \cdot v_{\text{к}} \cdot l_x}{k_{\text{уд.э}} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}. \quad (2.65)$$

Здесь $k_{\text{эп}} = \frac{k_{\text{хп}}}{k_{\text{эп}}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тя-

гово-сцепных свойств двигателя и условий эксплуатации. Для наиболее вероятных условий работы следует принимать $k_{\text{эп}} = 0,23$.

Энергонасыщенность погрузчика $N_{ЭН}$ увеличивается с ростом v и l_x и уменьшается с ростом прочности материала. Энергонасыщенность $(N/m)_{опт}$ увеличивается с ростом дальности холостых перемещений погрузчика.

Минимальная продолжительность рабочего цикла экскаватора-погрузчика определяется подстановкой значения $m_{опт}$ в зависимость для определения времени цикла t_u

$$t_{ц\text{эл} \min} = k_{t \min} \left(\frac{k_{уд.э} \cdot l_x}{v_k \cdot k_3} \right)^{1/2}, \text{ с.} \quad (2.66)$$

Здесь $k_{t \min}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от тягово-цепных параметров двигателя скрепера и условий эксплуатации,

$$k_{t \min} = 2(k_{эп} \cdot k_{хп})^{1/2}.$$

Для наиболее вероятных условий работы принимают $k_{t \min} = 3,14$.

Максимальная производительность экскаватора-погрузчика определяется на основании соотношения $\Pi = q_э/t_u$ и величины $t_{ц\text{эл} \min}$.

$$\Pi_{\max} = k_{\Pi} \cdot q_э \cdot \left(\frac{v_k \cdot k_3}{k_{уд.э} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (2.67)$$

Здесь $k_{\Pi} = \frac{1}{k_{t \min}}$ – безразмерный коэффициент, для наиболее

вероятных условий эксплуатации $k_{\Pi} = 0,32$.

Максимальную производительность, определяемую по этой формуле, имеет машина, работающая в условиях, когда обеспечивается минимальная продолжительность рабочего цикла $t_{u \min}$.

Для предварительных расчетов величину Π_{\max} экскаватора-погрузчика можно рассчитывать по зависимостям, рассмотренным в гл. 2.3.

Выбор экскаватора-погрузчика осуществляют по величине показателей $m_{опт}$ и $(N/m)_{опт}$. Из имеющихся машин выбирают экскаватор-погрузчик с параметрами m и N/m , ближайшими к расчетным $m_{опт}$, $(N/m)_{опт}$. При наличии нескольких машин с одинаковыми параметрами m и N/m расчет уточняется по цене машино-часа и цене единицы продукции C (руб./ч) и $C_{уд}$ (руб./м³). С этими параметрами, как следует из рассмотренных положений, погрузчик обеспечивает максимальную производительность при минимальных удельных энерго- и материалоемкости.

Порядок выбора машины рассмотрен в гл. 2.4.

На основании полученных соотношений и методов, рассмотренных в гл. 2.3, могут быть установлены другие технические и эксплуатационные параметры – мощность N , вместимость ковша $q_э$, $q_{п}$, прочностные характеристики грунта по показателю $k_{уд.к}$ и др.

2.3. Определение параметров землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации

2.3.1. Формирование зависимостей связи между основными параметрами объектов техники

Материалы по определению основных технических и эксплуатационных параметров, рассмотренные выше (гл. 2.1, 2.2), основываются на анализе (минимизации) математической модели продолжительности рабочего цикла машины. Влияющие параметры рассматриваются в качестве независимых переменных. Метод позволяет установить оптимальный результат для конкретной машины и заданных условий эксплуатации. Общее решение получают при рассмотрении машины в виде подобного объекта группы подобных машин. Объединение анализа времени рабочего цикла и теории подобия позволяет решить две задачи: получить оптимальный результат методом минимизации времени рабочего цикла и обобщить результат на другие подобные объекты техники и условия эксплуатации.

Теория подобия представляет собой синтез теорий моделирования и эксперимента. Она является руководством по экспериментальному изучению объекта, обобщению и отражению полученного результата на другие объекты. Ответ на вопрос, почему результаты опытов с моделью объекта отличаются от оригинала, и что надо сделать, чтобы этого не было, был получен Ньютоном в теореме о механическом подобии тел.

Теория подобия и моделирования основывается на трех теоремах подобия и дополнительных положениях. В работах акад. В.П. Горюхина и проф. В.А. Веникова [10] показано применение принципа подобия для построения серии разнообразных сельскохозяйственных машин и в области энергетики, определение значения различных сил, выяснение зависимости сопротивления от линейных размеров. Дальнейшее наиболее полное развитие и отражение теории подобия применительно к механике сплошных сред имеются в работах по гидро- и аэродинамике [1, 5, 10, 23, 35].

Автор классических трудов по строительной механике и теории упругости проф. В.Л. Кирпичев в книге «Беседы о механике» [10], изданной впервые в 1907 г., изложил теорему о подобии в механике и описал динамические модели. Он же впервые, в 1874 г., сформулировал и доказал третью теорему подобия при исследовании упругих явлений. Изучению проявления горного давления на моделях посвящена монография [23], составленная под руководством Г.Н. Кузнецова. Вопросы применения подобия и размерностей в механике горных пород поставлены и решаются в ряде других работ. Центробежное модели-

рование статических явлений и динамических процессов в дисперсных системах изложены в работах проф. Г.И. Покровского и др.

Первая теорема подобия формулирует свойства подобных систем, утверждая, что подобные явления имеют одинаковые критерии подобия, т.е. первая теорема указывает необходимые условия подобия.

Доказательство возможности приведения уравнения к критериальному виду составляет содержание второй теоремы подобия (π -теорема). Однако применение метода анализа размерностей не отражает достаточных условий для существования подобия.

В третьей теореме теории подобия указываются пределы закономерного распространения единичного опыта. Доказано, что подобными явлениями будут только те, которые имеют подобные условия однозначности и одинаковые определяющие критерии. Определяющие критерии состоят из независимых между собой величин, которые входят в условия однозначности (геометрические соотношения, физические параметры, краевые условия: начальные и граничные).

Критерии подобия – суть безразмерные выражения, которые можно рассматривать как некоторую среднюю меру отношения интенсивности двух физических эффектов, существенных для исследуемого процесса. Критерии подобия определяют различными путями: либо из условий тождественности уравнений, описывающих процессы, или из анализа размерностей, разновидностью которого является метод нулевых размерностей.

Теория подобия исходит из тех же предпосылок, что и аналитический расчет: должны быть заданы начальные (граничные) условия, параметры и координаты исследуемого процесса. Теория подобия, таким образом, служит связующим звеном между теорией и экспериментом.

Определение параметров подобных объектов. Прием основывается на первом следствии, которое устанавливает связь между параметрами подобных объектов. В этом случае уравнения, характеризующие процессы в объектах, одинаковы, а критерии подобия равны. Следовательно, если объекты, явления подобны, т.е. уравнения, характеризующие объекты, одинаковы, а критерии подобия равны, то параметры проектируемого объекта можно определить через его главный параметр (который всегда бывает задан или устанавливается на основе минимизации времени рабочего цикла) и параметры машины, принятой за эталон (модель), которые также известны.

Зависимости для определения технических параметров машин, получаемые на базе регрессионных моделей, не позволяют в ряде случаев получить их с учетом требуемых ограничений, следующих из условий эксплуатации. Причиной является отсутствие достаточно полной информации о количественных и качественных характеристиках объектов техники, подвергаемых статистическому анализу. Нет сведений о

серийности машин, не указывается в ряде случаев назначение машины.

Определение рациональных технических параметров на основании минимизации математической модели продолжительности рабочего цикла и закономерностей подобия позволяет учесть особенности рассматриваемых систем и более обоснованно устанавливать технические параметры машины. Конструктивно подобные машины в подобных условиях эксплуатации имеют соответственно равные критерии подобия и пропорциональные параметры, определяющие условия однозначности. Для получения требуемых зависимостей необходимо определить критерии подобия системы и условия однозначности.

Связи между параметрами землеройных машин определяются на основании критериев подобия при установившемся процессе взаимодействия рабочего органа машины с грунтом. Это позволяет получить более простые зависимости. В условиях технологии работы землеройной машины, при малых скоростях движения, ошибка от несоблюдения критериев подобия, появляющаяся при неустановившемся режиме движения машины, не превышает допустимой.

Критерии подобия определяют из уравнения движения машины.

$$T = W_k + W_e + W_m;$$

$$N = T \cdot v_p;$$

$$T = \varphi_{сц} \cdot mg;$$

$$W_m = f_m \cdot mg;$$

$$W_e = q \cdot \gamma_e \cdot f_e;$$

$$W_k = k_{уд.к} \cdot bh;$$

$$q \approx l^3.$$

Выше приняты следующие обозначения:

T – тяговое усилие, развиваемое двигателем, Н;

$\varphi_{сц}$ – коэффициент сцепления двигателя;

W_m – сопротивление передвижению машины, Н;

W_e – сопротивление перемещению объема грунта, отделенного от массива (объем грунта перед отвалом, в ковше скрепера, погрузчика или экскаватора), Н;

W_k – сопротивление отделения грунта от массива (сопротивление копания соответствующего рабочего органа), Н;

m – масса машины, грунта, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

f_m – коэффициент сопротивления перемещению машины;

f_e – коэффициент сопротивления перемещению грунта;

q – вместимость ковша, объем грунта перед отвалом, м³;

γ_e – объемный вес грунта, Н/м³;

$k_{уд.к}$ – удельное сопротивление грунта копанию рабочим органом машины, Н/м²;

bh – площадь поперечного сечения отделенного грунта, m^2 ;

l – обобщенный линейный размер системы «машина – грунт», m .

Делением параметров на один из них получают безразмерные комплексы-критерии подобия:

$$П_1 = k_{y\partial.k} \cdot bh / T; \quad П_2 = q \cdot \gamma_e \cdot f_e / T; \quad П_5 = T \cdot v_p / N;$$

$$П_3 = f_m \cdot mg / T; \quad П_4 = \varphi_{cu} \cdot mg / T; \quad П_6 = l^3 / q.$$

Критерии подобия представляют собой отношения физических эффектов, характеризующих систему «машина-грунт»: сил сопротивления копанью, перемещению объема грунта и самой машины к тяговому усилию, развиваемому двигателем. Соответствующие критерии подобия для подобных машин являются равными. Из равенства критериев подобных машин получают связи между масштабными величинами, входящими в критерии подобия. Отношения между масштабами величин называют индикаторами подобия. Эти соотношения у подобных машин равны единице.

$$K_{ky\partial} \cdot K_b K_h / K_T = 1; \quad K_q \cdot K_{\gamma_e} \cdot K_{f_e} / K_T = 1; \quad K_{f_m} \cdot K_m K_g / K_T = 1;$$

$$K_{\varphi_{cu}} \cdot K_m K_g / K_T = 1; \quad K_T \cdot K_v / K_N = 1; \quad K_l^3 / K_q = 1.$$

Рассматриваемые машины работают в одинаковых грунтовых условиях и с равными рабочими скоростями. В этом случае масштабы величин $k_{y\partial.k}$, γ_e , f_e , f_m , g , φ_{cu} , v_p будут равны единице $K_{ky\partial} = 1$; $K_{\gamma_e} = 1$; $K_{f_e} = 1$; $K_{f_m} = 1$; $K_g = 1$; $K_{\varphi_{cu}} = 1$; $K_v = 1$.

Индикаторы подобия упрощаются и приобретают вид

$$K_b K_h / K_T = 1; \quad K_q / K_T = 1; \quad K_m / K_T = 1; \quad K_T / K_N = 1; \quad K_l^3 / K_q = 1.$$

В системе индикаторов подобия два первых выражения определяют критерии подобия в виде отношения сил различной природы к тяговому усилию двигателя.

$$\frac{K_{y\partial} \cdot K_b \cdot K_h}{K_T} = 1 \text{ или } \frac{K_{y\partial} \cdot K_l^2}{K_T} = 1,$$

$$\frac{K_q \cdot K_{\gamma}}{K_T} = 1 \text{ или } \frac{K_{\gamma} \cdot K_l^3}{K_T} = 1.$$

Индикатор $\frac{K_{y\partial} \cdot K_l^2}{K_T} = 1$ определяет отношение масштабов сил

структурной прочности отделяемого от массива грунта, а индикатор

$\frac{K_{\gamma} \cdot K_l^3}{K_T} = 1$ масштабов сил гравитационной природы к масштабу тяго-

вого усилия, развиваемого двигателем.

Условия соблюдения этих индикаторов подобия и, следовательно, критериев подобия для подобных землеройных машин требуют отдельного рассмотрения.

Таблица 3.1

Формулы для определения основных технических параметров экскаваторов и дорожных машин

Рассчитываемый параметр	Определяющий параметр				
	N	T	m	q	l
Мощность N	–	$k_1 \cdot T$	$k_2 \cdot m$	$k_3 \cdot q$	$k_4 \cdot l^3$
Тяговое усилие T	$k_5 \cdot N$	–	$k_6 \cdot m$	$k_7 \cdot q$	$k_8 \cdot l^3$
Масса m	$k_9 \cdot N$	$k_{10} \cdot T$	–	$k_{11} \cdot q$	$k_{12} \cdot l^3$
Вместимость основного ковша q	$k_{13} \cdot N$	$k_{14} \cdot T$	$k_{15} \cdot m$		$k_{16} \cdot l^3$
Линейный размер l_i	$k_{17} \cdot N^{1/3}$	$k_{18} \cdot T^{1/3}$	$k_{19} \cdot m^{1/3}$	$k_{20} \cdot q^{1/3}$	–
Вместимость ковша дополнительного оборудования q_d	$k_{21} \cdot N$	$k_{22} \cdot T$	$k_{23} \cdot m$	$k_{24} \cdot q$	$k_{25} \cdot l^3$
Грузоподъемность m_{gp}	$k_{26} \cdot N$	$k_{27} \cdot T$	$k_{28} \cdot m$	$k_{29} \cdot q$	$k_{30} \cdot l^3$
Рабочая скорость $v = 1,0 \dots 1,5$ м/с	$V = const$				

Подобные землеройные машины имеют различные линейные размеры (рабочего органа и др. элементов машины) и разрабатывают среду с различными физико-механическими свойствами. С изменением линейных размеров действующие на машину нагрузки имеют разную физическую природу и изменяются по различным законам.

Нагрузки гравитационной природы (масса машины, масса грунта и др.) пропорциональны линейным размерам в кубе или масштабу линейного размера в кубе K_l^3 .

Силы сопротивления разрушению материала пропорциональны площади поперечного сечения (прочность отделяемой стружки грунта, прочность элементов конструкции и др.) или масштабу линейного размера элементов машины в квадрате K_l^2 .

При масштабном моделировании это противоречие ликвидируется путем использования метода эквивалентных материалов или метода центробежного моделирования [5, 10, 23].

В условиях эксплуатации землеройных машин это противоречие снимается соблюдением соответствующих условий эксплуатации практическим путем.

Легкие машины с меньшими рабочими органами используются в основном для разработки менее прочных грунтов. Это следует из приведенных выше индикаторов подобия

$$k_{уд.лег} = \frac{k_{уд.тяж}}{K_l}, \text{ Н/м}^2,$$

здесь $k_{уд.лег}$ – удельное сопротивление разрушению грунтов в условиях работы легкой машины, Н/м²;

$k_{уд.тяж}$ – удельное сопротивление разрушению грунтов в условиях работы тяжелой машины, Н/м²;

K_l – масштаб линейного размера рабочего органа по обобщенному или основному линейному размеру.

При эксплуатации малоразмерных машин в тех же грунтовых условиях, в которых работает крупноразмерная машина, действующие нагрузки уменьшаются за счет уменьшения толщины разрабатываемой стружки грунта или глубины резания

$$h_{\text{лег}} = \frac{h_{\text{тяж}}}{K_l^2}, \text{ м},$$

здесь $h_{\text{лег}}$ – глубина резания, толщина вырезаемой стружки легкой машины, м;

$h_{\text{тяж}}$ – глубина резания тяжелой машины, м.

Рассмотренные условия (при эксплуатации) соблюдаются путем реализации соответствующих режимов работы. Это обеспечивает соблюдение условия подобия землеройной техники. Связки между основными техническими параметрами, которые приведены на графиках, рис. 9 – 12, следуют из основных законов подобия.

Рассмотренные положения показывают, что землеройные машины являются подобными техническими объектами. Рабочие процессы землеройных машин описываются одинаковыми уравнениями технической механики и имеют равные критерии подобия $\Pi_i = idem$. Из равенства критериев подобия следует, что между основными техническими параметрами машин m , N , q , T , l и др. имеют место связи подобия. Такие зависимости получают на базе анализа соответствующих индикаторов подобия.

Зависимости подобия между основными техническими параметрами землеройных машин приведены в табл. 3.1 и 3.2 и иллюстрируются графиками на рис. 9 – 12. Зависимости получены на основании анализа законов механики и теории подобия технических систем. Нет необходимости использования методов регрессионного анализа по двум причинам. Связи между параметрами установлены на основании законов механики, что дает возможность установить причинно-следственные связи между параметрами. Регрессионные зависимости отражают следствие процесса и не раскрывают причины и характер протекания самого явления. Регрессионные зависимости используются при анализе процессов, для которых аналитические закономерности не установлены. Например, при установлении рыночных связей между параметрами и стоимостью машин. Однако и в этом случае регрессионные зависимости фиксируют следствие, не вскрывая причины протекания рыночного процесса и рыночных закономерностей.

Рассмотренные положения показывают, что для землеройных машин между главными техническими параметрами m , N , q , T , l и др. имеют место отношения, характеризующиеся соответственными масштабными коэффициентами. Эти машины следует рассматривать в

качестве подобных. Критерии подобия таких систем, составленные из величин, определяющих основные технические параметры, будут соответственно равными друг другу $\Pi_i = \text{idem}$.

Анализ статистических данных подтверждает это положение. Для различных типов землеройных машин имеют место подобные соотношения по основным техническим параметрам массы m , вместимости ковша q и мощности N . Подобные соотношения установлены для одноковшовых экскаваторов (рис. 9, 10), бульдозеров, скреперов, автогрейдеров (рис. 11), ковшовых фронтальных погрузчиков (рис. 12), экскаваторов-погрузчиков и др.

Таблица 3.2

Коэффициенты пропорциональности для подобных экскаваторов и дорожных машин

Коэффициент	Расчетная зависимость	Коэффициент	Расчетная зависимость	Коэффициент	Расчетная зависимость
k_1	$\frac{N_0}{T_0}$	k_{11}	$\frac{m_0}{q_0}$	k_{21}	$\frac{q_{\partial 0}}{N_0}$
k_2	$\frac{N_0}{m_0}$	k_{12}	$\frac{m_0}{l_0^3}$	k_{22}	$\frac{q_{\partial 0}}{T_0}$
k_3	$\frac{N_0}{q_0}$	k_{13}	$\frac{q_0}{N_0}$	k_{23}	$\frac{q_{\partial 0}}{m_0}$
k_4	$\frac{N_0}{l_0^3}$	k_{14}	$\frac{q_0}{T_0}$	k_{24}	$\frac{q_{\partial 0}}{q_0}$
k_5	$\frac{T_0}{N_0}$	k_{15}	$\frac{q_0}{m_0}$	k_{25}	$\frac{q_{\partial 0}}{l_0^3}$
k_6	$\frac{T_0}{m_0}$	k_{16}	$\frac{q_0}{l_0^3}$	k_{26}	$\frac{m_{\partial p 0}}{N_0}$
k_7	$\frac{T_0}{q_0}$	k_{17}	$\frac{l_0}{N_0^{1/3}}$	k_{27}	$\frac{m_{\partial p 0}}{T_0}$
k_8	$\frac{T_0}{l_0^3}$	k_{18}	$\frac{l_0}{T_0^{1/3}}$	k_{28}	$\frac{m_{\partial p 0}}{m_0}$
k_9	$\frac{m_0}{N_0}$	k_{19}	$\frac{l_0}{m_0^{1/3}}$	k_{29}	$\frac{m_{\partial p 0}}{q_0}$
k_{10}	$\frac{m_0}{T_0}$	k_{20}	$\frac{l_0}{q_0^{1/3}}$	k_{30}	$\frac{m_{\partial p 0}}{l_0^3}$

Система соотношений между основными параметрами подобных машин, как следует из графиков, может быть представлена в виде таблицы (см. табл. 3.1). Расчет коэффициентов пропорциональности для параметров подобных землеройных машин осуществляется по формулам, приведенным в табл. 3.2.

Коэффициенты пропорциональности устанавливаются по параметрам существующей высокоэффективной машины, принимаемой за эталон, или параметрам, замеренным на соответствующей модели новой техники, которая показывает высокую эффективность, или устанавливаются аналитически, например, методом минимизации времени рабочего цикла машины. Этим параметрам присваивается индекс «0».

Зависимости подобиya устанавливаются тенденцию изменения параметров. Конкретную зависимость получают по формулам, установленным на основании анализа математических моделей продолжительности рабочего цикла, рассмотренных в гл. 2.1, 2.2, или на основании других аналитических расчетов. Объединяя зависимости, полученные на базе минимизации математических моделей (гл. 2.2) и связей между параметрами подобных объектов (см. табл. 3.1), получают зависимости, обеспечивающие более общий результат для машин, составляющих подобную группу техники.

2.3.2. Определение оптимальных параметров машин в зависимости от условий эксплуатации

Математические модели эффективности работы землеройной машины в зависимости от влияющих факторов, рассмотренные в гл. 2.1 и 2.2, основаны на минимизации математических моделей продолжительности рабочего цикла. Параметры функции рассматриваются в качестве независимых переменных. Оптимальное решение получают последовательным изменением одного из факторов при фиксированном значении других. Затем процесс повторяется. Такие зависимости позволяют решать задачи касающиеся установления степени влияния каждого из параметров на определяемую величину. Это представляет интерес на этапах исследования и проектирования новых машин. Получение более общих зависимостей основывается на анализе машины в виде подобного объекта, составляющего группу подобных машин. В этом случае связи между параметрами определяются методами подобиya по зависимостям, рассмотренным выше и систематизированным в табл. 3.1.

Аналитические связи между влияющими параметрами N , q , Π и др. устанавливаются на основании равенства критериев подобиya машин в виде следующих соотношений табл. 3.1:

$$N = k_{2_}m; \quad N = k_{3_}q; \quad m = k_{11_}q; \quad q = k_{13_}N;$$

$q = k_{15} \cdot m$; $q_{\partial} = k_{24} \cdot q$; $m_{\text{эп}} = k_{28} \cdot m$ и др.

Соответствующие зависимости для определения коэффициентов подобия k_2 , k_3 , k_{11} и др. приведены в табл. 3.2.

Обобщенные математические модели продолжительности рабочего цикла машин с ковшовым рабочим органом (одноковшовый экскаватор, ковшовой погрузчик и др. Такие математические модели получают путем подстановки соотношения $q = k_{13} \cdot N$, табл. 3.1, в математическую модель продолжительности рабочего цикла землеройной машины, рассмотренную в гл. 2.2. Машины с отвальным и рыхлительным рабочим органом (бульдозер, автогрейдер, рыхлитель и др.) характеризуются другими соотношениями, рассмотренными ниже. На основании соотношения подобия $q = k_{13} \cdot N$, табл. 3.1, получают обобщенные математические модели продолжительности рабочего цикла основных групп ковшовых землеройных машин.

Для экскаваторов 1-й и 2-й размерных групп

$$t_{\text{ц}} = \frac{k_{\text{уд.э}} \cdot k_{13} \cdot N \cdot k_{\text{э1}}}{mg \cdot v_{\text{к}}} + \frac{mg \cdot l_{\text{нэ}} \cdot k_{\text{нэ}}}{N}, \text{ с.} \quad (3.1)$$

Для скреперов

$$t_{\text{ц}} = \frac{k_{\text{уд.с}} \cdot k_{13} \cdot N \cdot k_{\text{р.мп1}}}{mg \cdot v_{\text{к}}} + \frac{mg \cdot l_{\text{х}} \cdot k_{\text{сх}}}{N}, \text{ с.} \quad (3.2)$$

Для одноковшовых погрузчиков

$$t_{\text{ц}} = \frac{k_{\text{уд.п}} \cdot k_{13} \cdot N \cdot k_{\text{з.пр}}}{mg \cdot v_{\text{к}}} + \frac{mg \cdot l_{\text{х}} \cdot k_{\text{хп}}}{N}, \text{ с.} \quad (3.3)$$

Для экскаваторов-погрузчиков

$$t_{\text{ц}} = \frac{k_{\text{уд.э}} \cdot k_{13} \cdot N \cdot k_{\text{эп}}}{mg \cdot v_{\text{к}}} + \frac{mg \cdot l_{\text{х}} \cdot k_{\text{хп}}}{N}, \text{ с.} \quad (3.4)$$

Обобщенные математические модели продолжительности рабочего цикла машин с отвальными и рыхлительными и рабочими органами. Модели определяются с учетом пропорциональности площади вырезаемой отвалом стружки или прорези рыхления зубьями рыхлителя F мощности двигателя машины N

$$F_i = k_i \cdot N, \text{ м}^2,$$

где k_i – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^2/\text{Вт}$. Величина k_i зависит от вида машины, см. табл. 3.3.

Бульдозер является машиной с отвальным рабочим органом. Математическая модель времени рабочего цикла характеризуется зависимостью (2.30), см. гл. 2.2.3.

Основной операцией бульдозера является резание грунта отвалом. Площадь сечения вырезаемой стружки грунта пропорциональна тяговому классу машины и соответственно его мощности. Чем больше

мощность, тем большее сечение стружки отделяет бульдозер от массива. Эта зависимость имеет вид

$$F_p = k_{31} \cdot N, \text{ м}^2,$$

где $F_p = b \cdot h$ – площадь сечения стружки грунта, м^2 ;

k_{31} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^2/\text{Вт}$. Для бульдозеров $k_{31} = 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Вт}$.

Объем грунта перед отвалом бульдозера равный $q = b \cdot h \cdot l_k$ определяется зависимостью

$$q = k_{31} \cdot N \cdot l_k.$$

Обобщенная математическая модель рабочего цикла бульдозера имеет вид

$$t_{\text{ц}} = k_{\text{уд.б}} \frac{k_{31} \cdot N \cdot l_k \cdot k_{\text{пр.б}}}{m \cdot g \cdot v_k} + \frac{m \cdot g \cdot l_x \cdot k_{\text{хб}}}{N}, \text{ с.} \quad (3.5)$$

Обобщенная математическая модель продолжительности времени рабочего цикла рыхлителя определяется на основании зависимости (2.38), см. гл. 2.3 и положений подобия, рассмотренных выше.

$$t_{\text{ц}} = k_{\text{уд.р}} \frac{k_{31} \cdot N \cdot l_p \cdot k_{\text{вн.м}}}{m \cdot g \cdot v_p} + \frac{m \cdot g \cdot l_x \cdot k_{\text{хр}}}{N}, \text{ с.} \quad (3.6)$$

где $F_p \cdot n_3 = k_{31} \cdot N$ – площадь сечения прорези грунта, разрыхленного рыхлителем за рабочий цикл, м^2 ;

F_p – площадь сечения прорези от одного зуба, м^2 ;

n_3 – количество зубьев.

Обобщенная математическая модель продолжительности рабочего цикла бульдозера-рыхлителя определяется на основании зависимости (2.46), см. гл. 2.2.4, и положений подобия, рассмотренных выше:

$$t_{\text{ц}} = k_{\text{уд.р}} \frac{k_{31} \cdot N \cdot l_p \cdot k_{\text{вн.м}} \cdot k_{\text{бр}}}{m \cdot g \cdot v_p} + \frac{m \cdot g \cdot l_{\text{хб}} \cdot k_{\text{хб}} \cdot k_{\text{хбр}}}{N}, \text{ с.} \quad (3.7)$$

где $k_{31} \cdot N = F_p \cdot n_3$ – площадь сечения прорези грунта, разрыхленного рыхлителем за рабочий цикл, м^2 .

Обобщенная математическая модель продолжительности рабочего цикла автогрейдера определяется на основании (2.55), см. гл. 2.2, и положений подобия автогрейдеров – пропорциональности площади сечения вырезаемой автогрейдером стружки грунта и мощности двигателя автогрейдера:

$$t_{\text{ц}} = k_{\text{уд.а}} \frac{k_{31} \cdot N \cdot l_p \cdot k_{\text{р.пл}}}{m \cdot g \cdot v_p} + \frac{m \cdot g \cdot l_x \cdot k_{\text{ха}}}{N}, \text{ с.} \quad (3.8)$$

где k_{31} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^2/\text{Вт}$. Для автогрейдеров $k_{31} = 0,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Вт}$.

$F_a = k_{31} \cdot N$ – площадь сечения вырезаемой автогрейдером стружки грунта, м^2 .

Математические модели продолжительности рабочего цикла t_u , рассмотренные выше, являются основой для определения технико-эксплуатационных параметров конкретного вида техники в зависимости от условий эксплуатации.

На основании анализа выражения $dt_u/dm = 0$ по каждому виду техники получают оптимальную массу соответствующей машины и другие технико-эксплуатационные параметры на основе учета взаимного влияния технических параметров машины, в частности взаимосвязи мощности N и объема ковша q . Принятые обозначения приведены ранее и в гл. 2.2.

Характер изменения времени рабочего цикла и производительности землеройных машин по обобщенным зависимостям, учитывающим связи между определяющими переменными, приведен на рис. 2, 3, 4, 5, 8.

Анализ зависимостей показывает тождественность структуры расчетных формул для определения технических параметров землеройных машин, входящих в группу подобных машин одного и того же вида и назначения. Различие в количественных результатах определяется особенностью рабочего процесса каждой машины, характеризующейся величиной коэффициентов, которые зависят от конструкции и условий эксплуатации машины.

Определение основных технико-эксплуатационных параметров группы ковшовых землеройных машин, в которую входят экскаваторы 1-й и 2-й групп, скреперы, одноковшовые погрузчики и экскаваторы-погрузчики, осуществляется на основании зависимостей, имеющих общую структуру и отличающихся величиной влияющих факторов и коэффициентов подобия.

Исходные соотношения – математические модели, определяющие время рабочего цикла машины и приведенные выше, учитывают основные условия эксплуатации машины (прочность грунта $k_{y\partial}$, дальность перемещения машины l , скорость рабочих операций v_p и ряд тягово-сцепных параметров) через безразмерные коэффициенты влияния. Исходные соотношения получены также с учетом связей между влияющими техническими параметрами.

Рассмотренные положения позволяют при необходимости искомые технико-эксплуатационные параметры для конкретных условий эксплуатации установить через влияющие технические параметры, требуемые для конкретного расчетного случая.

Оптимальная масса машины m_{opt} , как показано в гл. 2.2, получена в виде выражения от влияющих факторов, рассматриваемых как независимые переменные. Это формулы (2.10), (2.18), (2.26) и др.

Обобщенная математическая модель времени рабочего цикла с учетом изменения вместимости ковша в зависимости от мощности двигателя определяется зависимостями (3.1) – (3.4).

На основании выражений вида $\frac{dt_u}{dm} = 0$ определяют оптимальную массу для подобных машин и условий эксплуатации.

По величине оптимальной массы $m_{опт}$ как главного технического параметра и зависимостей подобия (см. табл. 3.1) получают формулы для расчета технических параметров соответствующих видов подобных землеройных машин. Это позволяет обобщить частное оптимальное решение на подобные машины и условия эксплуатации. На этой основе по известной оптимальной массе $m_{опт}$ определяют другие параметры машины:

вместимость ковша

$$q = k_{15} \cdot m_{опт}, \text{ м}^3;$$

мощность двигателя

$$N = k_2 \cdot m_{опт}, \text{ Вт.}$$

Аналогично определяются масса $m_{опт}$ и мощность N по заданной величине производительности:

$$m = \frac{1}{k_{15}} \cdot \Pi \cdot t_{u \text{ min}}, \text{ кг};$$

$$N = \frac{1}{k_{13}} \cdot \Pi \cdot t_{u \text{ min}}, \text{ Вт.}$$

Определение значений Π_{max} , $t_{u \text{ min}}$ рассмотрено в гл. 2.2. Величины размерных коэффициентов подобия k_2 , k_{13} , k_{15} и др. определяются зависимостями, приведенными в табл. 3.2.

После подстановки величин $m_{опт}$, Π и $t_{u \text{ min}}$ и преобразований получают развернутые формулы для расчета соответствующих параметров.

Обобщенные зависимости для определения оптимальной массы машины $m_{опт}$ для машин с ковшовым рабочим органом (одноковшовый экскаватор, ковшовой погрузчик и др.). $m_{опт}$ могут быть установлены по величине вместимости ковша q , заданной мощности двигателя N или требуемой производительности Π :

по заданной вместимости ковша q , м³,

$$m = k_{m_{опт}} \cdot q \cdot \left(\frac{k_{yд} \cdot k_3}{g^2 \cdot v \cdot l} \right)^{1/2}, \text{ кг}; \quad (3.9)$$

по заданной мощности двигателя N , Вт,

$$m = k_{m_{опт}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{yд} \cdot k_{13}}{g^2 \cdot v \cdot l} \right)^{1/2}, \text{ кг}; \quad (3.10)$$

по заданной производительности Π , м³/с,

$$m = k_{t_{\min}} \cdot \Pi \cdot \left(\frac{k_{y\partial} \cdot l}{v \cdot k_2 k_{15}} \right)^{1/2}, \text{ кг.} \quad (3.11)$$

Оптимальная энергонасыщенность

$$\frac{N}{m} = k_{\text{эн}} \left(\frac{g^2 \cdot v \cdot l}{k_{y\partial} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.} \quad (3.12)$$

Минимальное время рабочего цикла

$$t_{u_{\min}} = k_{t_{\min}} \left(\frac{k_{y\partial} \cdot l}{v \cdot k_3} \right)^{1/2}, \text{ с.} \quad (3.13)$$

Максимальная производительность Π_{\max} может быть установлена по величине оптимальной массы машины $m_{\text{опт}}$, вместимости ковша q или мощности двигателя N :

по заданной массе m , кг,

$$\Pi = k_{\Pi} \cdot m \cdot \left(\frac{v \cdot k_2 k_{15}}{k_{y\partial} \cdot l} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (3.14)$$

по заданной вместимости ковша q , м³,

$$\Pi = k_{\Pi} \cdot q \cdot \left(\frac{v \cdot k_3}{k_{y\partial} \cdot l} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (3.15)$$

по заданной мощности N , Вт,

$$\Pi = k_{\Pi} \cdot N \cdot \left(\frac{v \cdot k_{13}}{k_{y\partial} \cdot l} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.16)$$

Производительность, рассчитанная по приведенным формулам, является максимальной. Такую производительность обеспечивает машина в условиях работы с минимальной продолжительностью рабочего цикла $t_{u_{\min}}$.

Вместимость ковша q и мощность двигателя N могут быть установлены по заданной производительности Π .

Вместимость ковша

$$q = \frac{1}{k_{\Pi}} \cdot \Pi \cdot \left(\frac{k_{y\partial} \cdot l}{v \cdot k_3} \right)^{1/2}, \text{ м}^3. \quad (3.17)$$

Мощность двигателя

$$N = \frac{m}{k_{m_{\text{опт}}}} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v \cdot l_x}{k_{y\partial.э} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт.} \quad (3.18)$$

Обобщенные зависимости для определения технико-эксплуатационных параметров бульдозеров получают аналогично рассмотренным выше положениям.

Оптимальная масса бульдозеров группы подобных машин определяется по формулам:

при заданной мощности

$$m = k_{m_{opt}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{yд.б} \cdot k_{31} \cdot I_K}{g^2 \cdot v_p \cdot I_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}; \quad (3.19)$$

при заданной производительности

$$m = \frac{1}{k_{\Pi} k_2} \cdot \Pi \cdot \left(\frac{k_{yд.б} \cdot I_x}{v_p \cdot I_K \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ кг}. \quad (3.20)$$

Оптимальная энергонасыщенность бульдозера

$$\frac{N}{m} = k_{эн} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot I_x}{k_{yд.б} \cdot k_{31} \cdot I_K} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}. \quad (3.21)$$

Мощность двигателя по заданной производительности

$$N = \frac{1}{k_{\Pi}} \cdot \Pi \cdot \left(\frac{k_{yд.б} \cdot I_x}{v_K \cdot I_K \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт}. \quad (3.22)$$

Минимальная продолжительность рабочего цикла

$$t_{u_{min}} = k_{t_{min}} \left(\frac{k_{yд.б} \cdot k_{31} \cdot I_K \cdot I_x}{v_K} \right)^{1/2}, \text{ с}. \quad (3.23)$$

Максимальная производительность по заданной массе

$$\Pi = k_{\Pi} \cdot k_2 \cdot m \cdot \left(\frac{v_K \cdot I_K \cdot k_{31}}{k_{yд.б} \cdot I_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (3.24)$$

по заданной мощности

$$\Pi = k_{\Pi} \cdot N \cdot \left(\frac{v_K \cdot I_K \cdot k_{31}}{k_{yд.б} \cdot I_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.25)$$

Определение дальности пути копания и пути холостого хода определяются на основании анализа объема грунта, который скапливается перед отвалом бульдозера при копании

Величина объема грунта перед отвалом бульдозера q определяется площадью сечения вырезаемой бульдозером стружки грунта F_6 и объемом грунта в призме волочения перед отвалом

$$q = F_6 \cdot l_K, \text{ м}^3,$$

где $F_6 = b \cdot h$ – площадь сечения стружки грунта, м^2 ;

b – длина отвала (ширина резания), м ;

h – средняя глубина резания, зависит от тягового класса машины, м;

l_k – длина пути копания, м.

Величина l_k зависит от объема грунта перед отвалом бульдозера q_b .

$$q_b = \frac{bH^2}{2\text{tg}\varphi}, \text{ м}^2,$$

где H – высота отвала, м;

φ – угол естественного откоса грунта, $\text{tg } \varphi = 1$.

Объем вырезаемой стружки грунта, и объем грунта перед отвалом равны друг другу

$$q = q_b.$$

Площадь вырезаемой стружки грунта F_b пропорциональна мощности бульдозера

$$F_b = k_{31} \cdot N, \text{ м}^2.$$

Объем грунта перед отвалом бульдозера также пропорционален мощности

$$q = k_{13} \cdot N, \text{ м}^3,$$

где k_{13} , k_{31} – размерные коэффициенты подобия, для бульдозеров $k_{31} = 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Вт}$; $k_{13} = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Вт}$.

Подставляя в формулу для определения объема грунта в призме волочения значения q и F_b , получаем выражение

$$k_{13} \cdot N = k_{31} \cdot N \cdot l_k.$$

Отсюда величина пути копания

$$l_k = k_{13}/k_{31}, \text{ м.}$$

Подставляя значения k_{13} и k_{31} , получаем

$$l_k = \frac{0,2 \cdot 10^{-4}}{0,2 \cdot 10^{-5}} \cong 10 \text{ [м]}.$$

Бульдозеры используются для резания и затем перемещения вырезанного грунта на расстояние в среднем на 50...70 м. Следовательно, среднее расстояние холостого хода бульдозера равно сумме расстояний резания и перемещения вырезанного грунта $l_x = l_k + l_p$. Или $l_x = (5...8) \cdot l_k$, м.

Обобщенные зависимости для определения технико-эксплуатационных параметров рыхлителей получают аналогичным образом.

Оптимальная масса рыхлителя в зависимости от условий эксплуатации в группе подобных по энергонасыщенности машин $k_2 = N_0/m_0$ [Вт/кг] определяется

при заданной мощности двигателя

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{yд.р} \cdot k_{31} \cdot l_p}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}; \quad (3.26)$$

при заданной производительности рыхлителя

$$m_{\text{опт}} = \frac{\Pi}{k_{\Pi} \cdot k_2} \cdot \left(\frac{k_{yд.р} \cdot l_x}{k_{31} \cdot v_p \cdot l_p} \right)^{1/2}, \text{ кг}. \quad (3.27)$$

Оптимальная энергонасыщенность рыхлителя

$$\frac{N}{m} = k_{эН} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{yд.р} \cdot k_{31} \cdot l_p} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}. \quad (3.28)$$

Мощность двигателя рыхлителя по заданной массе

$$N = \frac{m}{k_{m_{\text{опт}}}} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{yд.р} \cdot k_{31} \cdot l_p} \right)^{1/2}, \text{ Вт}. \quad (3.29)$$

Минимальное время рабочего цикла рыхлителя

$$t_{ц \text{ min}} = k_{t \text{ min}} \cdot \left(\frac{k_{yд.р} \cdot k_{31} \cdot N \cdot l_p \cdot l_x}{m \cdot v_p \cdot k_2} \right)^{1/2}, \text{ с}. \quad (3.30)$$

Максимальная производительность рыхлителя по заданной массе

$$\Pi = k_{\Pi} \cdot k_2 \cdot m \cdot \left(\frac{k_{31} \cdot v_p \cdot l_p}{k_{yд.р} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (3.31)$$

по заданной мощности N , Вт,

$$\Pi = k_{\Pi} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{31} \cdot v_p \cdot l_p}{k_{yд.р} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.32)$$

Выше приняты следующие обозначения:

$k_{yд.р}$ – удельное сопротивление грунта рыхлению зубом рыхлителя, Н/м², см. табл. 1.1;

k_2, k_{31} – размерные коэффициенты подобных преобразований,

k_2 Вт/кг; k_{31} м²/Вт; см. табл. 1.2;

l_p – длина пути рыхления, м;

l_x – длина пути холостого хода, м, при челночной схеме $l_p = l_x = 15 \dots 50$ м.

Значения безразмерных коэффициентов, зависящих от условий эксплуатации приняты: $k_{m_{\text{опт}}} = 5,5$; $k_{эН} = 0,03$; $k_{\Pi} = 0,25$; $k_{t \text{ min}} = 4$.

Производительность, рассчитанная по приведенным формулам, является максимальной. Такую производительность обеспечивает

машина в условиях работы с минимальной продолжительностью рабочего цикла $t_{ц\ min}$.

Обобщенные зависимости для определения технико-эксплуатационных параметров бульдозера с рыхлительным оборудованием получают на основании аналогичных положений, принимая за определяющую рабочую операцию агрегата – рыхление.

Оптимальная масса бульдозерно-рыхлительного агрегата в группе подобных по энергонасыщенности машин $k_2 = N_0/m_0$ [Вт/кг] и определяющей рабочей операции агрегата – рыхлению при заданной мощности двигателя

$$m_{опт} = k_{m_{опт}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{уд.р} \cdot k_{31} \cdot l_p}{g^2 \cdot v_p \cdot l_{хб}} \right)^{1/2}, \text{ кг}; \quad (3.33)$$

при заданной производительности по рыхлению

$$m = \frac{\Pi}{k_{\Pi} \cdot k_2} \cdot \left(\frac{k_{уд.р} \cdot l_x}{k_{31} \cdot v_p \cdot l_p} \right)^{1/2}, \text{ кг}. \quad (3.34)$$

Оптимальная энергонасыщенность бульдозерно-рыхлительного агрегата

$$\frac{N}{m} = k_{эн} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_{хб}}{k_{уд.р} \cdot k_{31} \cdot l_p} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}. \quad (3.35)$$

Мощность двигателя бульдозера с рыхлительным оборудованием по заданной массе

$$N = \frac{m}{k_{m_{опт}}} \cdot \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{уд.р} \cdot k_{31} \cdot l_p} \right)^{1/2}, \text{ Вт}. \quad (3.36)$$

Минимальная продолжительность рабочего цикла бульдозера с рыхлительным оборудованием

$$t_{ц\ min} = k_{t\ min} \cdot \left(\frac{k_{уд.р} \cdot k_{31} \cdot l_p \cdot l_x}{v_p} \right)^{1/2}, \text{ с}. \quad (3.37)$$

Максимальная производительность агрегата по заданной массе

$$\Pi = k_{\Pi} \cdot k_2 \cdot m \cdot \left(\frac{k_{31} \cdot v_p \cdot l_p}{k_{уд.р} \cdot l_{хб}} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (3.38)$$

по заданной мощности N , Вт,

$$\Pi = k_{\Pi} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{31} \cdot v_p \cdot l_p}{k_{уд.р} \cdot l_{хб}} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.39)$$

Производительность, рассчитанная по приведенным формулам, является максимальной. Такую производительность обеспечивает машина в условиях работы с минимальной продолжительностью времени рабочего цикла $t_{u \min}$.

Выше приняты следующие обозначения:

$k_{yд.p}$ – удельное сопротивление грунта рыхлению зубом рыхлителя, Н/м², см. табл. 1.1;

k_2, k_{31} – размерные коэффициенты подобных преобразований,

k_2 Вт/кг; k_{31} м²/Вт; см. табл. 1.2;

l_p – длина пути рыхления, м;

$l_{хб}$ – длина пути холостого хода бульдозера, м;

$k_{m \text{ опт}}, k_{эн}, k_{\Pi}, k_{t \min}$ – безразмерные коэффициенты, зависящие от условий эксплуатации каждой машины, принимают $k_{m \text{ опт}} = 4,6$; $k_{эн} = 0,05$; $k_{\Pi} = 0,15 \dots 0,18$; $k_{t \min} = 5 \dots 6,6$.

Обобщенные зависимости для определения технико-эксплуатационных параметров автогрейдеров получают аналогично рассмотренным выше методам.

Оптимальная масса автогрейдера в зависимости от условий эксплуатации в группе подобных по энергонасыщенности машин $k_{33} = F_a/N$ [Вт/кг] определяется

при заданной мощности двигателя

$$m_{\text{опт}} = k_{m_{\text{опт}}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{yд.a} \cdot k_{31} \cdot l_p}{g^2 \cdot v_p \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг}; \quad (3.40)$$

при заданной производительности автогрейдера в пог. м/с, (м/с)

$$m = \frac{\Pi^2}{k_{\Pi}^2} \cdot \frac{k_{yд.a} \cdot N \cdot l_x \cdot k_{31}}{v_p \cdot l_p \cdot k_2}, \text{ кг}. \quad (3.41)$$

Оптимальная энергонасыщенность автогрейдера

$$\frac{N}{m} = k_{эн} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{yд.a} \cdot l_p \cdot k_{31}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг}. \quad (3.42)$$

Минимальное время рабочего цикла автогрейдера при условии подобия машин $k_{31} = F_a/N$

$$t_{u \min} = k_{t \min} \cdot \left(\frac{k_{yд.a} \cdot k_{31} \cdot l_p \cdot l_x}{v_p} \right)^{1/2}, \text{ с}. \quad (3.43)$$

Максимальная производительность автогрейдера по заданной массе и мощности

$$\Pi = k_{\Pi} \cdot \left(\frac{m \cdot v_p \cdot l_p \cdot k_2}{k_{yд.a} \cdot k_{31} \cdot N \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ пог. м /с}; \quad (3.44)$$

по заданной мощности N , Вт,

$$P = k_{\Gamma} \cdot \left(\frac{v_p \cdot l_p}{k_{y\partial.a} \cdot k_{31} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ пог. м/с.} \quad (3.45)$$

Производительность, рассчитанная по приведенным формулам, является максимальной. Эту производительность обеспечивает машина в условиях работы с минимальной продолжительностью рабочего цикла $t_{ц min}$.

Выше приняты следующие обозначения:

$k_{y\partial.a}$ – удельное сопротивление грунта резанию ножом отвала автогрейдера, Н/м², см. табл. 1.1;

k_2 – размерный коэффициент подобия, для автогрейдеров

k_2 Вт/кг; см. табл. 1.2;

k_{31} – размерный коэффициент подобия, для автогрейдеров

k_{31} Вт/кг; см. табл. 1.2;

l_p – длина пути резания, планировки, м;

l_x – длина пути холостого хода, м;

$k_{m опт}$, $k_{Эн}$, k_{Γ} – безразмерные коэффициенты, зависящие от условий эксплуатации, принимают $k_{m опт} = 3,1$; $k_{Эн} = 0,1$; $k_{\Gamma} = 0,5$. Остальные обозначения приведены в гл. 2.

Полученные выше зависимости дают оптимальные значения определяемых параметров $m_{опт}$, $(N/m)_{опт}$ и др. При этих значениях параметров в заданных условиях эксплуатации ($k_{y\partial}$, l и др.) машина обеспечивает минимально возможное время рабочего цикла $t_{ц}$ и максимально возможную производительность P при минимальных удельных энергетических и материальных затратах.

Вместимость ковша и основные линейные размеры рабочего органа (ширина ковша, длина отвала и др.) устанавливаются по величине главного технического параметра – оптимальной массы $m_{опт}$.

Вместимость ковша экскаватора и погрузчика устанавливается на базе расчетной величины оптимальной массы $m_{опт}$ и соотношений подобия, табл. 3.1 по формуле

$$q = k_{15} \cdot m_{опт}, \text{ м}^3; \quad (3.46)$$

для дополнительного погрузочного ковша экскаватора-погрузчика

$$q = k_{23} \cdot m_{опт}, \text{ м}^3, \quad (3.47)$$

где $m_{опт}$ – оптимальная масса машины, кг, установленная для каждого вида машин и условий эксплуатации по формулам рассмотренным в гл. 2.2;

k_{15} – размерный коэффициент подобия, м³/кг, см. табл. 1.2. Величина k_{15} зависит от вида машины и типа рабочего органа;

k_{23} – размерный коэффициент подобия, м³/кг, см. табл. 3.1, 3.2. Величина k_{23} зависит от вида машины и типа рабочего органа.

Линейные размеры рабочего органа l определяются на основании величины оптимальной массы $m_{опт}$ и зависимостей, приведенных в табл. 3.1, по формуле

$$l = k_{19} \cdot m_{опт}^{1/3}, \text{ м}, \quad (3.48)$$

где $m_{опт}$ – оптимальная масса машины, кг, определяется по формулам, рассмотренным в гл. 2.2 и выше;

k_{19} – размерный коэффициент подобия, м/кг^{1/3}. Величина k_{19} зависит от вида машины и типа рабочего органа. Значения k_{19} приведены в табл. 1.2.

Другие размеры рабочего органа (например, высота, глубина и др. размеры ковша) при необходимости могут быть установлены на основании рекомендаций, приведенных в ГОСТ 17257, ГОСТ 27255, ГОСТ 27920, ГОСТ 27923, ГОСТ 29290, ГОСТ 29291, ГОСТ 29295.

При известной массе машины исходные параметры q , N , Π могут быть установлены на основании формул, рассмотренных в начале расчета.

Необходимо подчеркнуть, что расчеты по приведенным зависимостям выполняются в системе СИ (кг, м, с, Н, Н/м², Н/м³).

Соответствующие расчетные технические и эксплуатационные параметры и коэффициенты необходимо подставлять в формулы с учетом вида рассматриваемой машины. Значения соответствующих величин для каждого вида техники приведены в табл. 1.1 и 1.2.

Обобщенные зависимости, полученные на основе объединения методики анализа (минимизации) времени рабочего цикла землеройных машин и теории подобия, позволяют решить две задачи – установить оптимальные технико-эксплуатационные параметры землеройной машины в зависимости от условий эксплуатации и обобщить полученный результат на группу подобных объектов техники и условий эксплуатации.

Выше приняты следующие обозначения:

m – масса машины, кг;

q – вместимость ковша экскаватора, скрепера, погрузчика, объем грунта перед отвалом бульдозера, м³;

N – мощность двигателя, Вт;

N/m – энергонасыщенность, Вт/кг;

t_u – время рабочего цикла машины, с;

Π – производительность машины максимальная, м³/с;

$k_{y\partial}$ – удельное сопротивление копанию рабочим органом соответствующей машины, Н/м²; Среднемаксимальные значения удельных сопротивлений копанию $k_{y\partial}$ для конкретных рабочих органов землеройных машин приведены в табл. 1.1.

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

v – рабочая скорость рабочего органа или машины при копании, м/с;

l – дальность холостых перемещений машины, м;

$k_{m\text{ опм}}, k_{эн}, k_{t\text{ min}}, k_{П}$ – безразмерные коэффициенты, зависящие от условий эксплуатации каждой машины, см. табл. 1.2;

$k_2, k_3, k_{13}, k_{15}, k_{31}$ – размерные коэффициенты подобия для каждого вида техники, см. табл. 1.2.

Методы расчета и определения удельных сопротивлений копанью для традиционных и новых видов техники рассмотрены в ряде работ, список которых дан в разделе «Литература». Определение размерных коэффициентов подобия землеройных машин рассмотрено выше. Величина безразмерных коэффициентов, зависящих от условий эксплуатации, рассчитывается для каждого вида землеройной техники, см. гл. 2.2 и 2.3.

При проектировании новой техники полученные значения главного параметра m , технико-эксплуатационных параметров $N, П, t_{ц}$ и др., геометрических параметров (емкости коша q и линейных размеров рабочего органа b, H, l) уточняются традиционными расчетами при разработке конструкторской документации на этапах эскизного и технического проектов.

По величине $t_{ц\text{ min}}$ могут быть в порядке прогноза установлены предельные значения основных технико-эксплуатационных показателей машины: максимальная производительность $П_{max}$, минимальные энергоемкость $N_{yд}$, материалоемкость $m_{yд}$ и соответствующий обобщенный показатель $П_{Nm}$, а также минимальные значения показателей коммерческой эффективности цена в единицу времени C и цена единицы продукции $C_{yд}$.

Например, для случая, когда объем грунта перед отвалом или емкость ковша изменяется с изменением мощности двигателя бульдозера, на основании соотношения подобия систем $q_b = k_{13} \cdot N$, получены следующие зависимости.

Для определения минимальной продолжительности рабочего цикла бульдозера

$$t_{ц\text{ min}} = k_{t\text{ min}} \cdot \left(\frac{k_{yд.б} \cdot k_{13} \cdot l_x}{v_k} \right)^{1/2}, \text{ с.}$$

Для определения максимальной производительности

$$П_{max} = 1 / k_{t\text{ min}} \cdot N \cdot \left(\frac{k_{13} \cdot v_k}{k_{yд.б} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с.}$$

Для определения минимальной удельной энергоемкости

$$N_{y\partial} = k_{t \min} \cdot \left(\frac{k_{y\partial.б} \cdot I_x}{v_k \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{м}^3.$$

Для определения минимальной удельной материалоемкости

$$m_{y\partial} = k_{t \min} \cdot \frac{m}{N} \cdot \left(\frac{k_{y\partial.б} \cdot I_x}{v_k \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ кг} \cdot \text{с} / \text{м}^3.$$

Для определения минимальной цены единицы продукции

$$C_{y\partial} = k_{t \min} \cdot \frac{C_{мч}}{N} \cdot \left(\frac{k_{y\partial.б} \cdot I_x}{v_k \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ руб.} / \text{м}^3.$$

k_{13} – размерный коэффициент подобия, для бульдозеров

$k_{13} = 0,2 \times 10^{-4}$, м³/Вт. Другие обозначения приведены ранее.

2.4. Выбор землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации. Примеры расчета

Разработанная методика минимизации продолжительности рабочего цикла машины позволяет использовать метод на этапе эксплуатации и при расчете машин на этапе проектирования. В эксплуатации методика используется для выбора объектов техники для эффективной работы в заданных условиях. На этапе проектирования метод используется для определения оптимальных основных исходных технико-эксплуатационных параметров машины m , N , q , P_{max} , $N_{y\partial}$ и др. необходимых в дальнейшем для проведения традиционных расчетов.

Порядок и методика расчета определяются постановкой задачи и исходной информацией.

2.4.1. Выбор землеройной машины на основании информации об объемах, сроках выполнения работ и прочности разрабатываемого грунта. Состав и последовательность расчета

1. Рассчитывается требуемая производительность машины для выполнения заданного объема работ в требуемое время. Расчетная формула

$$P_{треб} = \frac{V_{\Sigma}}{3600 \cdot T_{см} \cdot T_{ч} \cdot n \cdot k_{уп}}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определяют значения исходных величин.

V_{Σ} – общий объем работ, м³ (информация предоставляется производителем работ). В примере объем работ равен 25000 м³.

$T_{см}$ – время выполнения работ в сменах, В примере $T_{см} = 10$ смен.

$T_{ч}$ – число часов работы машины в смену. $T_{ч} = 8$ ч/смену.

n – количество землеройных машин, которые могут одновременно работать на строительном участке. В примере $n = 1$.

$k_{уп}$ – безразмерный коэффициент использования парка машин, принято в примере $k_{уп} = 0,8$.

Подставляют установленные величины в формулу, получают

$$П_{треб} = \frac{25000}{3600 \cdot 10 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 0,8} = 0,1 \text{ [м}^3/\text{с]} \text{ (391 м}^3/\text{ч)}.$$

Разработка грунта осуществляется экскаватором обратная лопата.

2. Рассчитывается оптимальная масса экскаватора по величине $П_{треб}$ и условиям эксплуатации (прочности грунта, дальности холостого перемещения и др.). Расчетная формула имеет вид

$$m_{опт} = k_{t\min} \cdot П_{треб} \cdot \left(\frac{k_{уд.э} \cdot l_x}{v_p \cdot k_2 \cdot k_{15}} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Определяют значения исходных величин:

$k_{t\min}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 2-й размерных групп $k_{t\min} = 3$ см. табл. 1.2.

k_2, k_{15} – размерные коэффициенты подобия. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 3-й размерных групп

$$k_2 = 5,0 \text{ Вт/кг}; k_{15} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}, \text{ см. табл. 1.2.}$$

$k_{уд.э}$ – удельное сопротивление грунта при копании ковшом экскаватора, $k_{уд.э} = 200000 \text{ Н/м}^2$, см. табл. 1.1.

l_x – дальность передвижения экскаватора по строительному участку. Определяется производителем работ. В примере $l_x = 3 \text{ м}$, см. табл. 1.2.

v_p – скорость копания грунта ковшом экскаватора. Величина v_p имеет технологическое ограничение, $v_p = 1 \dots 2 \text{ м/с}$, см. табл. 1.2.

Остальные обозначения даны выше.

Подставляют установленные величины в расчетную формулу, получают

$$m_{опт} = 3 \cdot 0,1 \cdot \left(\frac{200000 \cdot 3}{1 \cdot 5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/2} = 17700 \text{ [кг]}.$$

3. Рассчитывается требуемая оптимальная энергонасыщенность $(N/m)_{опт}$. Расчетная формула

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{опт} = k_{эН} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{уд.э} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.}$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

$k_{эН}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 3-й размерных групп $k_{эН} = 0,26$, см. табл. 1.2.

k_{13} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^3/\text{Вт}$. Для экскаваторов с

оборудованием обратная лопата 1-й – 3-й размерных групп $k_{13} = 0,05 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Вт}$, см. табл. 1.2.

Другие величины приведены ранее.

Подставляя установленные величины в расчетную формулу, получают

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{\text{опт}} = 0,26 \left(\frac{9,81^2 \cdot 1 \cdot 3}{200000 \cdot 0,05 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/2} = 4,4 \text{ [Вт/кг]}.$$

Выбор машины осуществляется по величинам $m_{\text{опт}}$ и $(N/m)_{\text{опт}}$. Выбирают машину с параметрами m и N/m ближайшими к оптимальному. Параметр N/m может быть наибольшим. Выбор машины рассчитывается по величине минимального модуля разности соответствующих параметров.

Таблица 3.3
Сопоставление экскаваторов по величинам $m_{\text{опт}}$ и $(N/m)_{\text{опт}}$

№ п/п	Модель	Тип	$q, \text{ м}^3$	$m, \text{ т}$	$N, \text{ кВт}$	N/m	Модуль	
							$\Delta m = m_{\text{опт}} - m_i$	$\Delta (N/m) = (N/m)_{\text{опт}} - N/m$
1.	АТЕК-731	гус.	0,5..0,8	13	73,6	5,66	0,89	2,66
2.	АТЕК-851	кол.	0,5..0,8	12,5	67,4	5,39	2,0	2,39
3.	ЕК-12	кол.	0,5..0,65	12,85	59,6	4,64	1,65	1,64
4.	ЕТ-14	гус.	0,65	14,8	77,3	5,22	0,3	2,22
5.	ЕТ-16	гус.	0,65	16	77,3	4,83	1,5	1,83

Для рассматриваемых условий эксплуатации наиболее эффективным экскаватором следует считать модель ЕТ-16 (табл. 3.3). Машина имеет массу ближайшую к оптимальной и наибольшую энергонасыщенность. Такая машина эффективно выполняет рабочие операции по отделению грунта от массива и транспортные операции при холостых передвижениях машины. Для выбранной машины фиксируют данные по техническим параметрам m , N/m , q , N , v и др.

4. Сопоставляют производительность выбранной машины с требуемой производительностью.

Для выполнения заданного объема работ в требуемые сроки необходимо выполнить условие

$$P \geq P_{\text{треб.}}$$

Здесь P – производительность выбранной машины, $\text{м}^3/\text{с}$;

$P_{\text{треб}}$ – требуемая производительность для выполнения заданного объема работ в требуемые сроки, $\text{м}^3/\text{с}$.

Производительность выбранной машины определяется по формуле (3.15)

$$P_{\max} = k_{\Pi} \cdot q \cdot \left(\frac{v_p \cdot k_3}{k_{yд.э} \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Устанавливаются значения исходных величин:

q – вместимость ковша, определяется по технической характеристике выбранной машины. Для машины ЕТ-16 вместимость ковша составляет $q = 0,65 \text{ м}^3$;

k_{Π} – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаваторов $k_{\Pi} = 0,33$, см. табл. 1.2;

k_3 – размерные коэффициенты подобия, Вт/м³. Для экскаваторов $k_3 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3$, см. табл. 1.2.

Остальные величины приведены выше.

Подставляют значения в расчетную формулу, получают

$$P_{\max} = 0,33 \cdot 0,65 \cdot \left(\frac{1 \cdot 1,6 \cdot 10^5}{200000 \cdot 3} \right)^{1/2} = 0,11 \text{ [м}^3/\text{с]} (396 \text{ м}^3/\text{ч}).$$

Эта производительность должна быть равна или несколько больше требуемой, для выполнения заданного объема работ V_{Σ} в требуемое время.

$$P \geq P_{\text{треб.}}$$

$$0,11 \text{ м}^3/\text{с} \geq 0,1 \text{ м}^3/\text{с}. \text{ Условие выполняется.}$$

5. Определяют при необходимости ожидаемый расход топлива для выполнения заданного объема работ в смену.

$$G_{см} = 10^{-6} \frac{g_e}{\rho_m} \cdot N \cdot T_q \cdot n \cdot k_j, \text{ л/смену.}$$

Определяют значения входящих в формулу величин:

g_e – удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч). Определяется по справочной литературе [4]. Для двигателя типа Д-243С удельный расход топлива составляет 220 г/(кВт·ч).

ρ_m – плотность топлива, кг/л, для дизельного топлива 0,825 кг/л; для бензина 0,74 кг/л.

N – эксплуатационная мощность двигателя выбранного экскаватора. Для экскаватора ЕК-16 эксплуатационная мощность составляет 77 кВт [2].

T_q – число часов работы машины в смену, $T_q = 8 \text{ ч/смену}$.

n – количество землеройных машин, которые могут одновременно работать на строительном участке, в примере $n = 1$.

k_j – поправочный коэффициент, учитывающий расход топлива на запуск, прогрев и др.

Подставляют величины в расчетную формулу, получают

$$G_{см} = 10^{-6} \frac{220}{0,825} \cdot 77000 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 1 = 162 \text{ [л/смену]} (20,3 \text{ л/ч}).$$

2.4.2. Выбор землеройной машины на основании информации о прочности разрабатываемого грунта и расстоянии перемещения машины по участку.

Состав и последовательность расчета. Требуется выбрать экскаватор, имеющий вместимость ковша $q = 0,5 \text{ м}^3$ для разработки грунта с удельным сопротивлением при копании ковшем экскаватора $k_{уд.э} = 200000 \text{ Н/м}^2$, см. табл. 1.1.

В рассматриваемом случае информация об объектах и сроках выполнения работ не является определяющей.

1. Рассчитывают величину оптимальной массы машины $m_{опт}$. Расчетная формула (3.9)

$$m_{опт} = k_{m_{опт}} \cdot q \cdot \left(\frac{k_{уд.э} \cdot k_3}{g^2 \cdot v_k \cdot l_x} \right)^{1/2}, \text{ кг.}$$

Устанавливают значения параметров, необходимых для расчета.

q – вместимость ковша, определяется заданием $q = 0,5 \text{ м}^3$.

$k_{m_{опт}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 2-й размерных групп $k_{m_{опт}} = 4,2$, см. табл. 1.2.

k_3 – размерный коэффициент подобия. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 2-й размерных групп $k_3 = 1,6 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3$, см. табл. 1.2.

v_k – скорость копания, $v_k = 1 \dots 2 \text{ м/с}$;

l_x – дальность передвижения экскаватора по строительному участку, $l_x = 3 \text{ м}$, см. табл. 1.2.

Подставляют установленные величины в расчетную формулу, получают:

$$m_{опт} = 4,2 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{200000 \cdot 1,6 \cdot 10^5}{9,81^2 \cdot 1 \cdot 3} \right)^{1/2} = 21000 \text{ [кг]}.$$

2. Рассчитывают оптимальную энергонасыщенность экскаватора $(N/m)_{опт}$. Расчетная формула (3.12), см. гл. 2.3.3.

$$\left(\frac{N}{m} \right)_{опт} = k_{эН} \left(\frac{g^2 \cdot v_p \cdot l_x}{k_{уд.э} \cdot k_{13}} \right)^{1/2}, \text{ Вт/кг.}$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

$k_{эН}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 2-й размерных групп $k_{эН} = 0,26$, см. табл. 1.2.

k_{13} – размерный коэффициент подобия, $\text{м}^3/\text{Вт}$. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 3-й размерных групп

$$k_{13} = 0,05 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Вт}, \text{ см. табл. 1.2.}$$

Другие величины приведены ранее.

Подставляя установленные величины в расчетную формулу, получают

$$\left(\frac{N}{m}\right)_{\text{опт}} = 0,26 \cdot \frac{9,81^2 \cdot 1 \cdot 3}{200000 \cdot 0,05 \cdot 10^{-4}} = 4,4 \text{ [Вт/кг]}.$$

Выбор машины осуществляется по величинам $m_{\text{опт}}$ и $(N/m)_{\text{опт}}$. Выбирают машину с параметрами m и N/m , ближайшими к оптимальным. Величина N/m может быть несколько большей.

3. Рассчитывают производительность (при необходимости). Расчетная формула (3.14).

$$P_{\text{max}} = k_{\text{л}} \cdot m_{\text{опт}} \cdot \left(\frac{v \cdot k_2 \cdot k_{15}}{k_{\text{уд.э}} \cdot l_x}\right)^{1/2}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Устанавливают значения величин, входящих в формулу.

$k_{\text{л}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 2-й размерных групп $k_{\text{л}} = 0,33$, см. табл. 1.2.

k_2 – размерный коэффициент подобия, Вт/кг. Для экскаваторов с оборудованием обратная лопата 1-й – 2-й размерных групп $k_2 = 5$ Вт/кг, см. табл. 1.2.

Другие величины приведены выше.

Подставляя установленные величины в расчетную формулу, получают

$$P_{\text{max}} = 0,33 \cdot 21000 \cdot \left(\frac{1 \cdot 5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}}{200000 \cdot 3}\right)^{1/2} = 0,13 \text{ [м}^3/\text{с]} (468 \text{ м}^3/\text{ч}).$$

Предварительная коммерческая оценка эффективности определяется по рыночным величинам цены единицы продукции $C_{\text{уд}}$ и цены машино-часа $C_{\text{мч}}$. Фирма, у которой приобретается или берется в лизинг машина, должна дать консультацию по организации сервиса и поставки запчастей в течение всего срока эксплуатации машины.

2.5. Оценка коммерческой эффективности рационального использования машины. Пример расчета оценки эффективности

Разработанная методика минимизации времени рабочего цикла, рассмотренная в гл. 2.1, 2.2, 2.3 позволяет выбрать оптимальную землеройную машину в зависимости от условий эксплуатации по технико-эксплуатационным показателям эффективности: производительности P , удельных энергоемкости $N_{\text{уд}}$, материалоемкости $m_{\text{уд}}$ и обобщенному показателю энерго - материалоемкости P_{Nm} и др.

Предварительную оценку коммерческой эффективности использования машины, с оптимальной технико-эксплуатационной эффек-

тивностью для соответствующих условий эксплуатации, предлагается определять на основании использования рыночных показателей: цены машино-часа $C_{мч}$, руб./ч, или цены единицы продукции, например кубометра грунта, $C_{уд}$, руб./м³. **Цена машино-часа $C_{мч}$ и цена единицы продукции $C_{уд}$** , назначаемые владельцем техники, учитывают затраты на эксплуатацию машины и норму прибыли.

Принцип работы машин, основу которых составляет механическое силовое разрушение грунтов за последние десятилетия существенным образом не изменился. Для традиционной техники важно обеспечить оптимальное использование машин в тех условиях, где машина позволяет получить наибольший эффект и прибыль.

Тенденции развития землеройной техники на основе механического взаимодействия со средой стабилизировались. Эти тенденции были замечены рядом авторов [8]. Стабилизировались затраты, связанные с применением землеройных машин. Такое положение зафиксировано еще в 1950-1965 гг. и сохраняется в настоящее время. Стабилизационный предел со временем изменяется за счет проявления инфляционных тенденций и совершенствования машин на основе автоматизации, компьютеризации, экологизации, повышения комфорта и безопасности ведения работ. Цена экскаваторных работ по данным бюро национальных дорог США за этот же период также стабилизировалась [8]. Аналогичная тенденция имеет место и в РФ. Рост цены земляных работ, как указывалось, определяется инфляцией и другими перечисленными выше факторами. Это увеличение на перспективу может быть учтено коэффициентом, величина которого изменяется во времени.

$$C_{ер} = C_{ер0} (1 + at), \text{ руб./м}^3, \quad (3.49)$$

где $C_{ер0}$ – рыночная цена разработки грунта соответствующей техникой (руб./м³) на исходной точке отсчета; по состоянию на 2009 г. $C_{ер0} = 15,5...24,4$ руб./м³;

a – коэффициент увеличения цены за счет инфляции и других факторов в год. Для приближенных расчетов принимают $a = 0,05...0,08$;

t – время прогноза, год.

Ряд исследователей для определения $C_{ер}$ рекомендуют степенную зависимость

$$C_{ер} = C_{ер0} (1 + E)^t, \text{ руб./м}^3, \quad (3.50)$$

где E – норма эффективности, равная приемлемой для инвестора норме чистой прибыли (0,15...0,3).

Величина эксплуатационных затрат на один нормо-час или на единицу продукции может быть установлена на основании положений, рассмотренных в источниках [29].

По состоянию на 2009 г. цена земляных работ при разработке грунта II группы прочности экскаваторами, по расчетам профессора

А.В. Рубайлова, характеризуется величинами, приведенными в табл. 3.4.

Полученные зависимости по расчету продолжительности рабочих операций и производительности землеройных машин с учетом величин рыночной цены машино-часа и цены единицы продукции позволяют предварительно определить ожидаемый коммерческий эффект от использования оптимальной по технико-эксплуатационным показателям землеройной техники.

Таблица 3.4

Цена машино-часа и куб. м грунта

Марка экскаватора	Норма времени на 100 м ³ , ч	Эксплуатационная производительность, м ³ /ч	Цена машино-часа, \$/ч (руб./ч)	Цена 1 м ³ грунта, руб./м ³
ЭО-2621	5,9	16,94	12,4 (409)	24,1
ЭО-3311	4,1	24,39	16,2 (534)	21,9
ЭО-4112	2,6	38,46	18,1 (597)	15,5
ЭО-4225	2,2	45,45	32,4 (1069)	23,5
ЕК-400	2,2	45,45	28,8 (954)	20,9

Оценка затрат на разработку грунта по известной рыночной цене машино-часа $C_{мч}$

Затраты на использование машины на объекте $Z_{мех}$ за период до завершения работ

$$Z_{мех} = \frac{1}{3600} \cdot C_{мч} \cdot t_{ц} \cdot n_{ц} \cdot T_{ч} \cdot T_{см}, \text{ руб.}, \quad (3.51)$$

где $t_{ц}$ – продолжительность рабочего цикла, с, время $t_{ц}$ для каждой машины рассчитывается по приведенным выше зависимостям;

$C_{мч}$ – рыночная средняя цена машино-часа при эксплуатации машины, руб./ч;

$n_{ц}$ – число рабочих циклов в час, цикл/ч;

$T_{ч}$ – число часов работы машины в смену, ч/смена;

$T_{см}$ – число смен работы машины на участке до завершения работ, смена;

$1/3600$ – коэффициент перехода от размерности в секундах в часы, ч/с.

Из рассмотренной зависимости следует, что затраты на разработку грунта пропорциональны времени пребывания машины на объекте. Последнее пропорционально времени цикла. Чем больше произ-

водительность машины, тем меньше пребывание техники на объекте, и тем меньше затраты на разработку грунта.

Ожидаемый коммерческий эффект от сокращения затрат на разработку грунта за счет обоснованного выбора машины можно определить по формуле

$$\Delta Z_{\text{мех}} = K_{\text{кэ}} \cdot Z_{\text{мех}}, \text{ руб.}, \quad (3.52)$$

где $K_{\text{кэ}}$ – коэффициент уменьшения затрат на механизацию за счет использования оптимальной для условий эксплуатации машины.

Для машин, входящих в одну и ту же типоразмерную группу, коэффициент уменьшения затрат на механизацию разработки грунта за счет сокращения времени пребывания машины на строительном объекте может быть установлен по отношению масс оптимальной и неоптимальной машин. На основании анализа графиков изменения времени рабочего цикла машины $t_{\text{ц}}$ от массы можно установить, что время рабочего цикла сравниваемых машин при неизменных других параметрах k_{tmin} , $k_{\text{уд.к}}$, l_x , k_{15} , N , v_p пропорционально массе машины.

Следовательно, величина коэффициента уменьшения затрат $K_{\text{кэ}}$ может быть установлена по формуле

$$K_{\text{кэ}} = [\Delta m] / m_{\text{опт}},$$

где $K_{\text{кэ}}$ – безразмерный коэффициент предварительной коммерческой эффективности от использования оптимальной машины.

$[\Delta m] = [m_{\text{опт}} - m]$ — модуль разности масс оптимальной $m_{\text{опт}}$ и неоптимальной m машин, кг.

Наибольшая, допустимая рыночная цена машино-часа новой машины не должна превышать величину, определяемую соотношением

$$C_{\text{мч.нов}} \leq K_{\text{кэ}} C_{\text{мч.ст}}, \text{ руб./ч}, \quad (3.53)$$

где $C_{\text{мч.нов}}$ – рыночная цена машино-часа машины с оптимальной массой;

$C_{\text{мч.ст}}$ – рыночная цена машино-часа машины с неоптимальной массой.

Оценка ожидаемого коммерческого эффекта по цене единицы продукции, например, кубометра вынутого грунта

Эффект за смену по цене продукции при неизменной рыночной цене работы машины $C_{\text{мч}} = \text{const}$ определяется по формуле

$$\Delta \text{ком} = 3600 C_{\text{уд}} \cdot \Delta \Pi \cdot T_{\text{см}}, \text{ руб.}, \quad (3.54)$$

где $C_{\text{уд}}$ – рыночная цена единицы продукции, руб./м³;

$\Delta \Pi$ – прирост производительности за счет использования машины с оптимальной массой, м³/ч;

$T_{\text{см}}$ – число часов работы машины в смену, ч/см.

Машины, имеющие рациональные или близкие к оптимальным параметры, работают с большей производительностью. Прирост производительности определяется по формуле

$$\Delta\Pi = (\Pi_{max} - \Pi), \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (3.55)$$

где Π_{max} – максимальная производительность машины с оптимальной массой, $\text{м}^3/\text{ч}$;

Π – производительность машины с неоптимальной массой, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Величина $\Delta\Pi$ в формуле (3.55) может быть установлена по отношению масс оптимальной и неоптимальной машин. Из анализа графиков изменения времени рабочего цикла машины $t_{ц}$ в зависимости от массы следует, что время рабочего цикла сравниваемых машин при неизменных параметрах k_{min} , $k_{уд.к}$, l_x , k_{15} , N , v_p пропорционально массе машины. Формула (3.54) в этом случае принимает вид

$$\Delta\Pi = K_{кэ} \Pi_{max}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$K_{кэ} = [\Delta m] / m_{opt}.$$

Принятые обозначения указаны ранее.

Ожидаемый предварительный коммерческий эффект в смену на основании известной рыночной цены $C_{уд}$ продукции определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{ком} = 3600 C_{уд} \cdot K_{кэ} \cdot \Pi_{max} \cdot T_{см}, \text{ руб.} \quad (3.56)$$

Оценка коммерческого эффекта по величине удельной прибыли $P_{уд}$

Производители работ оценивают эффективность использования техники по безразмерному коэффициенту – величине удельной прибыли $P_{уд}$

$$P_{уд} = P_{чис.} / Ц_0,$$

где $P_{чис.}$ – чистая прибыль, руб.;

$Ц_0$ – первоначальная цена машины, руб.

Принимая, что $P_{чис.}$ пропорциональна величине экономического эффекта, удельную прибыль можно определить по формуле

$$P_{уд} = \frac{K \cdot \mathcal{E}_{ком}}{Ц_0}, \text{ руб.}, \quad (3.57)$$

где K – коэффициент, определяющий долю прибыли в общем экономическом эффекте.

Соответствие расчетов определяется степенью подобия принятой математической модели процессам, протекающим в условиях эксплуатации.

Рассмотренный метод анализа продолжительности рабочего цикла используется для оценки и выбора конкретного вида землеройной машины, предназначенной для выполнения конкретных земляных работ, входящих в конкретную группу подобных землеройных машин.

Метод может быть также использован для сопоставления оценки и выбора землеройной техники различного типоразмера.

Оценка эффективности и выбор типоразмерных групп машин для выполнения заданного объема работ в заданное время при разработке грунтов одной и той же категории прочности

По условию задачи каждая из машин в своей размерной группе является оптимальной по технико-эксплуатационным показателям (производительности, удельным энерго- и материалоемкости др.). Для выполнения работ требуется различное количество машин.

Затраты на механизацию заданного объема работ с использованием машин малого типоразмера определяется зависимостью:

$$Z_{\text{мех.м}} = C_{\text{мч.м}} \cdot n_{\text{м}} \cdot T_{\text{ч}} \cdot T_{\text{см}}, \text{ руб.}$$

Затраты на механизацию заданного объема работ с использованием тяжелых машин большого типоразмера определяются зависимостью

$$Z_{\text{мех.т}} = C_{\text{мч.т}} \cdot n_{\text{т}} \cdot T_{\text{ч}} \cdot T_{\text{см}}, \text{ руб.},$$

где $Z_{\text{мех.м}}$ – затраты при использовании машин малого типоразмера, руб.;

$Z_{\text{мех.т}}$ – затраты при использовании машин большого типоразмера, руб.;

$n_{\text{м}}$ – количество малоразмерной техники;

$n_{\text{т}}$ – количество крупноразмерной техники.

Остальные обозначения приведены выше.

Из равенства соотношений следует

$$C_{\text{мч.м}} \leq C_{\text{мч.т}} \cdot n_{\text{т}} / n_{\text{м}}.$$

Следовательно, заданный объем работ в заданное время может быть эффективно выполнен машинами малого типоразмера при условии, что цена машино-часа малоразмерных машин будет меньше цены машино-часа крупноразмерных машин.

Пример расчета предварительной коммерческой эффективности

Метод анализа (минимизации) продолжительности рабочего цикла машины, см. гл. 2.2, 2.3, 2.4, позволяет выбрать для заданных условий эксплуатации машину, использование которой на строительной площадке обеспечивает получение наибольшего эффекта по технико-эксплуатационным показателям. Расчет оценки коммерческой эффективности приведен ниже и выполняется в размерности СИ.

Расчет выполняется для машин одной и той же размерной группы, работающих в одинаковых условиях эксплуатации, разрабатывающих грунт одинаковой прочности, дальности передвижения, мощности двигателя и др. техническими параметрами. Машины отличаются в основном массами: оптимальной $m_{\text{опт}}$ и неоптимальной m .

1. Расчет коммерческой эффективности по величине рыночной цены машино-часа эксплуатации машины

Коммерческая эффективность рассчитывается по формуле

$$\Delta Z_{\text{мех}} = k_{\text{кэ}} \cdot Z_{\text{мех}}, \text{ руб.}$$

Устанавливаем исходные величины:

$k_{\text{кэ}}$ – коэффициент снижения затрат за счет сокращения времени пребывания на объекте машины большей производительности;

$Z_{\text{мех}}$ – затраты на выполнение заданного объема работ V_{Σ} в заданное время $T_{\text{см}} = 10$ смен.

$$Z_{\text{мех}} = C_{\text{мч}} \cdot T_{\text{ч}} \cdot T_{\text{см}}, \text{ руб.}$$

$$k_{\text{кэ}} = \frac{|\Delta m|}{m_{\text{опт}}}.$$

$C_{\text{мч}}$ – цена машино-часа работы машины на объекте.

Для экскаваторных работ принимают $C_{\text{мч}} = 500$ руб./ч, см.табл.

3.4.

Подставляя величины в расчетную формулу, получают

$$Z_{\text{мех}} = 500 \cdot 8 \cdot 10 = 40000 \text{ [руб.]}$$

$|\Delta m| = |m_{\text{опт}} - m|$ – модуль разности масс оптимального экскаватора $m_{\text{опт}}$ и неоптимального экскаватора m . $m_{\text{опт}}$ определяется расчетом и выбранной машиной. Для примера $m_{\text{опт}} = 14800$ (для экскаватора ЕК-14 с объемом ковша $q = 0,6 \dots 0,65 \text{ м}^3$). Неоптимальная машина $m = 12800$ кг (для экскаватора ЕК-12 с ковшом вместимостью $q = 0,5 \dots 0,65 \text{ м}^3$). Подставляем необходимые параметры в формулу для расчета $k_{\text{кэ}}$, получаем

$$k_{\text{кэ}} = \frac{|14800 - 12800|}{14800} = 0,14.$$

Исходные величины подставляются в формулу для определения коммерческого эффекта.

$$\Delta Z_{\text{мех}} = 0,14 \cdot 40000 = 5600 \text{ [руб.]}$$

Коммерческий эффект получен за счет сокращения времени пребывания машины на объекте. Выбранная машина выполняет заданный объем работ за счет большей производительности в более короткое время при одной и той же стоимости машино-часа работы машины.

2. Определение коммерческого эффекта в смену по величине рыночной цены одного куб. метра грунта

Рассчитывают коммерческий эффект в смену. Расчетная формула (3.42) имеет вид

$$Э_{\text{ком}} = 3600 \cdot C_{\text{уд.э}} \cdot k_{\text{кэ}} \cdot P_{\text{тах}} \cdot T_{\text{см}}, \text{ руб./смену}$$

Определяют значения величин, входящих в формулу:

$C_{\text{уд.э}}$ – цена м^3 грунта, разрабатываемого экскаватором, $C_{\text{уд.э}} = 20$ руб./ м^3 (табл. 3.4);

$k_{\text{кэ}}$ – безразмерный коэффициент коммерческой эффективности;

$T_{\text{см}}$ – число часов работы в смену, $T_{\text{см}} = 8$ ч/смену.

Коэффициент $k_{\text{кэ}}$ определяется по формуле

$$k_{кэ} = \frac{|\Delta m|}{m_{опт}},$$

где $m_{опт}$ – оптимальная масса, при которой экскаватор дает наибольшую производительность, см. гл. 1.2; $m_{опт} = 11700$ кг;

$|\Delta m|$ – модуль разности масс оптимальной $m_{опт}$ и m неоптимальной машин, кг. В расчете принято $m = 8800$ кг.

Модуль $|\Delta m|$ равен

$$|\Delta m| = |8800 - 11700| = 2900 \text{ [кг]}.$$

Величина $k_{кэ}$ равна

$$k_{кэ} = \frac{2900}{11700} = 0,24.$$

Соответствующие величины подставляют в расчетную формулу, получают

$$\mathcal{E}_{ком} = 3600 \cdot 20 \cdot 0,24 \cdot 0,1 \cdot 8 = 17280 \text{ [руб./смену]}.$$

Полученная величина определяет предварительное значение возможного максимального коммерческого эффекта в смену при работе выбранной машины, имеющей оптимальную массу $m_{опт}$ в условиях работы с минимальной продолжительностью рабочего цикла $t_{ц, min}$ и большей производительностью по сравнению с неоптимальной машиной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ведущие производители строительной и дорожно-строительной техники РФ выпускают широкую номенклатуру землеройных машин различного вида и назначения. Техника в основном соответствует современным технико-экологическим и социально-эргономическим нормам и требованиям. Число зарубежных производителей техники на рынке строительных машин РФ существенно увеличилось. Появился значительный сегмент рынка по реализации техники, бывшей в употреблении. Предлагается большое число машин различного типа, назначения и качества.

На рынке строительной техники потребитель стремится приобрести не только хорошую машину, необходимую для выполнения соответствующих строительных работ. Появилась необходимость в приобретении сопутствующих нематериальных услуг, обеспечивающих реализацию всех потенциальных возможностей, заложенных в машину производителем техники. Прежде всего возникает необходимость в приобретении услуг по оптимальному производственному использованию техники и рекомендаций по техническому сервису.

Потребителю необходимы рекомендации по обоснованному выбору техники для конкретных условий эксплуатации, которые имеют

место у клиента. Использование машины в тех условиях, где она дает наибольший эффект, обеспечивает клиенту получение большей прибыли. Задачи такого типа решаются методами оптимизации параметров в зависимости от влияющих факторов.

Определение оптимальных технико-эксплуатационных параметров землеройных машин на основе минимизации продолжительности рабочего цикла машины, рассмотренной в учебном пособии, будет полезным в решении таких вопросов. Разработанная методика позволяет решить две задачи – выбрать машину, обеспечивающую оптимальный результат в зависимости от условий эксплуатации методом минимизации продолжительности рабочего цикла машины, и обобщить полученный результат на подобные объекты техники и условия эксплуатации.

Прежде чем приступить к проектированию машины, необходимо сформировать техническое задание и обоснованно установить главные и основные исходные технические параметры (массу машины, мощность, размеры рабочего органа), которые в обычной практике задаются по аналогии.

Методика, основанная на минимизации времени выполнения технологических операций, дополняет существующие методы расчета в части установления характера влияния на технические параметры машин факторов, определяющих условия эксплуатации. Методика позволяет установить оптимальное значение основных технических параметров машины (масса m , энергонасыщенность N/m , мощность N и др.) в зависимости от условий эксплуатации.

На этапе проектирования метод целесообразно использовать для формирования технического задания на проектирование. Метод позволяет с большим обоснованием формировать исходные технические параметры с учетом заданных или ожидаемых условий эксплуатации. Установленные технические параметры m , N/m , N , Π , $t_{u\ min}$ и др. являются исходной базой для традиционных (силовых, энергетических, прочностных, эргономических, экологических, технико-экономических и других) расчетов. При необходимости параметры уточняются.

На этапе эксплуатации методика позволяет устанавливать рациональное значение основных технических параметров машин m , N/m , Π и других, по которым осуществляется выбор техники в зависимости от условий эксплуатации.

Эффективность землеройной машины с механическим воздействием на среду и циклическим рабочим процессом по основным показателям эффективности (времени цикла t_u , производительности Π , обобщенному показателю энергоемкости и материалоемкости Π_{Nm} , стоимости машино-часа и единицы вырабатываемого продукта и другим) имеет оптимальную величину при определенной величине массы и энергонасыщенности агрегата.

Технические параметры землеройной машины определяются на основании обобщенного положения, что величина силовых и энергетических параметров машин с традиционным механическим воздействием на среду зависит от выполняемых технологических операций, вероятностью их появления и действующими технико-эксплуатационными факторами.

Оптимальная масса m_{opt} и энергонасыщенность $(N/m)_{opt}$ являются функцией технико-эксплуатационных параметров машины. Производительность землеройных машин имеет максимальное значение, а время цикла обладает минимальным значением при определенном значении массы агрегата и зависит от мощности двигателя, рабочей скорости, свойств разрабатываемой среды и ряда других технико-эксплуатационных факторов.

Основными техническим параметром землеройной машины с механическим воздействием на среду и операциями транспортировки и холостых перемещений следует считать массу и энергонасыщенность машины. Другие параметры являются основными и производными.

Важным техническим параметром землеройной машины является величина отношения мощности установленного двигателя к массе машины N/m , или энергонасыщенность агрегата. Обеспечение высоких показателей эффективности целесообразно осуществлять за счет определенного увеличения мощности при сохранении неизменной оптимальной массы машины. Машина с оптимальной массой в пределах изменения величины $m_{opt} = \pm 5...7 \%$ от оптимального значения m эффективно работает в широком диапазоне изменения удельных сопротивлений грунта копанью в пределах $\pm 21...31 \%$ от средних значений, по которым была установлена величина m .

Выбор землеройной машины из имеющихся на рынке следует осуществлять по величинам m_{opt} и $(N/m)_{opt}$, рассчитанным по средне-максимальным наиболее вероятным факторам, определяющим условия эксплуатации, в которых машину предполагается использовать. Из имеющихся выбирают машину с параметрами m и N/m , ближайшими к оптимальным. Величина параметра (N/m) может быть несколько большей. При выборе машины из нескольких с параметрами, ближайшими к оптимальным, расчет следует уточнять по экономическим показателям (цена машино - часа, цена единицы продукции). Предпочтение следует отдать машине той фирмы, которая обеспечивает выбранной машине качественный сервис и поставку запчастей на весь период срока службы.

Разработанная методика обеспечивает установление условий эксплуатации, в которых землеройная машина с заданными параметрами позволяет получить наибольший эффект. Эксплуатация вне рекомендуемых параметров и условий приводит к потере производительности, росту ресурсозатрат и снижению прибыли.

Метод минимизации продолжительности рабочего цикла машины осуществляется последовательно. Определяется место машины в технологическом процессе. Устанавливается структурная модель процесса, последовательность выполнения операций в структуре рабочего цикла, возможность их совмещения и вероятность появления. Формируются математические модели для расчета продолжительности каждой операции в зависимости от технических и эксплуатационных параметров системы «машина-среда». Формируется математическая модель для расчета продолжительности всего рабочего цикла. Осуществляется анализ полученной функции и оптимизация значений влияющих факторов.

По величине $t_{u \min}$ могут быть в порядке прогноза установлены предельные значения основных технико-эксплуатационных показателей машины: максимальная производительность Π_{max} , минимальные энергоемкость $N_{y\partial}$, материалоемкость $m_{y\partial}$ и соответствующий обобщенный показатель Π_{Nm} , а также цены машино - часа и цены единицы продукции $C_{y\partial}$.

Математические модели обобщенного показателя эффективности t_u и $t_{u \min}$ формируются на основании общих закономерностей технической механики. Это позволяет рекомендовать обобщенные показатели t_u и $t_{u \min}$ для определения оптимальных исходных параметров и оценки эффективности инновационной техники на этапе формирования задания на проектирование.

Традиционные механические методы копания грунтов землеройными машинами практически исчерпали возможности существенной интенсификации процессов разработки грунта на основе совершенствования традиционного рабочего органа. Рабочие органы землеройных машин с традиционным воздействием на грунт хорошо изучены. Исследования в этой области выполнены в основном в последней половине XX столетия в Советском Союзе главным образом отечественными учеными Н.Г. Домбровским, А.Н. Зелениным, Ю.А. Ветровым и др. Установлены рациональная геометрия, размеры, форма, скоростные режимы рабочих органов экскаваторов, бульдозеров, рыхлителей и другой землеройной техники.

Существенное повышение эффективности земляных работ связывается с реализацией перспективных тенденций развития современного машиностроения: компьютеризации (широкое использование бортовых компьютеров и др.), интеллектуализации (создание самообучающейся техники), гибридизации (создание многоцелевой техники), экологизации (создание машин с безотходной технологией работ), эргономизации (обеспечение высокого уровня комфорта и безопасности для оператора и др.), повышения надежности и ресурса техники, обеспечения сервисного сопровождения и запчастями в течение срока службы

машины, оптимизации параметров машин, использования существующей техники в условиях, где она обеспечивает наибольший эффект и совершенствование технико-эксплуатационных параметров машин.

Использование достижений фундаментальных наук и физико-технических эффектов и прежде всего нанотехнологических материалов, а также газовой динамики, ультра- и инфракосебаний, СВЧ и др. является резервом повышения эффективности землеройной техники.

Наиболее доступным и менее затратным методом интенсификации землеройной техники является компьютерная реализация изменения параметров рабочего органа по ходу работы машины в зависимости от условий эксплуатации и использование машины в тех условиях, в которых машина имеет наибольший эффект.

Материал, рассмотренный в учебном пособии, будет способствовать активизации деятельности студентов, аспирантов и инженерно-технических работников по созданию и совершенствованию инновационной землеройной техники.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Приведите структурную модель рабочего цикла бульдозера. Какие операции составляют цикл? Какова последовательность выполнения операций? Определите продолжительность операции копания.
2. Приведите возможные схемы работы рыхлителя. Перечислите операции, составляющие рабочий цикл. Определите продолжительность операции холостого хода.
3. Дайте схему рабочего процесса многоцелевой машины экскаватор-погрузчик. Какие операции составляют рабочий цикл машины при выполнении экскаваторных и погрузочных работ? Определите продолжительность операции копания грунта экскаватором.
4. Приведите формулу для определения производительности ковшového фронтального погрузчика. Приведите график изменения времени рабочего цикла от массы машины.
5. Приведите методику определения времени рабочего цикла скрепера. Приведите график изменения времени цикла от массы машины.
6. Приведите методику определения оптимальной массы бульдозера в зависимости от технико-эксплуатационных факторов, составляющих условия эксплуатации машины.
7. Приведите методику определения оптимальной величины показателя энергонасыщенности машины. Как изменяется энергонасыщенность погрузчика в зависимости от массы?
8. Дайте определение показателя эффективности по сокращению продолжительности рабочих операций землеройной машины. Приведите пример определения времени цикла и отдельной операции.
9. Дайте схему выбора землеройной машины с заданными основными

- ми параметрами для эффективной работы в заданных условиях эксплуатации.
10. Приведите положения методики определения необходимого количества бульдозеров для выполнения заданного объема работ в заданное время.
 11. Как оценить коммерческий эффект от рационального использования землеройной машины по величине рыночной стоимости машино-смены?
 12. Какой метод используется для обобщения полученного оптимального результата на другие подобные машины? Приведите графики, подтверждающие подобие основных типов землеройных машин по основным техническим параметрам.
 13. Как сформировать математическую модель времени цикла землеройной машины? Дайте пример расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсеньев, Ю.Д. Теория подобия в инженерных экономических расчетах/ Ю.Д. Арсеньев – М.: Изд-во «Высшая школа», 1967. -257с.
2. Баловнев, В.И. Выбор и определение параметров одноковшовых экскаваторов: учеб. пособие для вузов/ В.И. Баловнев – М.: МАДИ (ГТУ), 2007. – 67 с.
3. Баловнев, В.И. Автомобили и тракторы: краткий справочник/ В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 384 с.
4. Баловнев, В.И. Многоцелевые дорожно-строительные машины: учеб. пособие/ В.И. Баловнев – Омск; М.: Омский Дом печати, 2006. – 320 с.
5. Баловнев, В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. 2-е изд./ В.И. Баловнев – М.: Машиностроение, 1994. –432 с.: ил.
6. Баловнев, В.И. Оценка инновационных предложений в дорожной и строительной технике: учеб. пособие/ В.И. Баловнев –М.: МАДИ (ГТУ), 2008. –100 с.
7. Баловнев, В.И. Оценка эффективности дорожных и коммунальных машин по технико-эксплуатационным показателям: учеб. пособие / В.И. Баловнев – М.: МАДИ, 2002. –28 с.
8. Беккер, М.Г. Введение в теорию систем местность-машина/ М.Г. Беккер –М.: Машиностроение, 1973. –520 с.
9. Бульдозеры и рыхлители / Б.З. Захарчук, В.Д. Телушкин, Г.А. Шлойдо и др. – М.: Машиностроение, 1987. –240 с.
10. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования/ В.А. Веников. –М.: Высшая школа, 1984. -439 с.

11. Ветров, Ю.А. Машины для земляных работ/ Ю.А. Ветров, В.А. Баладинский. – К.: Вища школа, 1980. –190 с.
12. Домбровский, Н.Г. Строительные машины (в 2-х ч.). Ч. II: учебник для студентов вузов/ Н.Г. Домбровский, М.И. Гальперин – М.: Высш. шк., 1985. – 224 с., ил.
13. Дорожно-строительные машины и комплексы: учебник для вузов / В.И. Баловнев, С.В. Абрамов [и др.]; под общей ред. В.И. Баловнева. – Москва–Омск: СибАДИ, 2001. –425 с.: ил.
14. Дорожные машины: в 2 ч.: учебник для вузов. – Ч. 1: Машины для земляных работ. 3-е изд., перераб. и доп. / Т.В. Алексеева [и др.] – М.: Машиностроение, 1972. – 504 с.
15. Живейнов, Н.Н. Копание грунтов ковшами гидравлических экскаваторов: учеб. пособие/ Н.Н.Живейнов – М.: МАДИ, 1995. – 60 с.
16. Зеленин, А.Н. Машины для земляных работ / А.Н. Зеленин, В.И. Баловнев, И.А. Керов. – М.: Машиностроение, 1975. –424 с.
17. Землеройно-транспортные машины / А.М. Холодов, В.В. Ничке [и др.] –Харьков: Вища школа, 1982. –192 с., ил.
18. Качество, эффективность и основы сертификации машин и услуг: учеб. пособие / М.И. Грифф, В.А. Зорин, А.В. Рубайлов. –М.: МАДИ (ТУ), 2000. –148 с.
19. Кудрявцев, Е.М. Комплексная механизация, автоматизация и механовооруженность строительства: учебник для вузов. –М.: Стройиздат, 1989. –330 с.
20. Локшин, Е.С. Строительные и дорожные машины: Обзор современной отечественной самоходной техники: учеб. пособие / Е.С. Локшин, А.В. Рубайлов – М.: РИА «Россбизнес», 2004. – 304 с.
21. Машины для земляных работ: учебник [для вузов] / Д.П. Волков [и др.]; под общей ред. Д.П. Волкова. – М.: Машиностроение, 1992. –448 с.: ил.
22. Машины для содержания и ремонта городских и автомобильных дорог: учеб. пособие / В.И. Баловнев, В.И. Мещеряков [и др.]; под общей ред. В.И. Баловнева. –М.; Омск: Омский дом печати, 2005. –767 с.: ил.
23. Моделирование проявления горного давления/ Г.Н. Кузнецов [и др.] –Л.: Недра, 1968. –279 с.
24. Недорезов, И.А. Интенсификация рабочих органов землеройно-транспортных машин/ И.А. Недорезов –М.: МАДИ, 1979. –51 с.
25. Николаев, С.Н. Качественный сервис – это, как минимум, вторая машина // Строительная техника и технологии. 2002, № 2. –С. 76-79.
26. Проектирование машин для земляных работ / А.М. Холодов [и др.]; под ред. А.М. Холодова. –Х.: Вища школа. Изд-во при Харьковском университете, 1986. –272 с.

27. Расстегаев, И.К. Разработка мерзлых грунтов в северном строительстве/ И.К. Растегаев –Новосибирск: Наука, 1992. – 351 с.
28. Российская энциклопедия самоходной техники: Основы эксплуатации и ремонта самоходных машин и механизмов. Т. 1 / В.А. Зорин, Ю.П. Бакатин, В.Н. Луканин [и др.]. – М.: Просвещение, 2001. –408 с., ил.
29. Самойлович, В.Г. Экономическая оценка вариантов технических решений. Методические указания для вузов/ В.Г. Самойлович–М.: МАДИ (ГТУ), 1993. –155 с.
30. Справочник конструктора дорожных машин / Б.Ф. Бондаков [и др.]; под ред. И.П. Бородачева. – 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Машиностроение, 1973. – 504 с.
31. Строительные машины. Справочник в 2-х т. /под ред. д-ра техн. наук В.А. Баумана и инж. Ф.А. Лапира. Т. 1. Машины для строительства промышленных, гражданских, гидротехнических сооружений и дорог. Изд. 4-е, перераб. и доп. –М.: Машиностроение, 1976. –502 с., ил.
32. Федоров, Д.И. Рабочие органы землеройных машин/ Д.И. Федоров, –М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.
33. Шестопалов, К.К. Строительные и дорожные машины/ К.К. Шестопалов –М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 384 с.
34. Caterpillar Справочник. Техничко-эксплуатационные характеристики машин фирмы Caterpillar: Справочник. – США, Пеория: Изд. Caterpillar Inc, 1997. –987 с.
35. Schuring, D.S. Scale models in engineering. New-Jork, Pergamon press, 1977. –289 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Система зависимостей для расчета оптимальных параметров и выбора землеройных машин	4
1.1. Общие сведения о технических характеристиках и параметрах землеройных машин.....	4
1.2. Зависимости для определения оптимальных параметров землеройных машин. Примеры расчета параметров.....	7
1.2.1. Одноковшовые экскаваторы 1-й – 2-й размерных групп.....	10
1.2.2. Бульдозеры	12
1.2.3. Рыхлители	14
1.2.4. Бульдозеры-рыхлители	16
1.2.5. Креперы	18
1.2.6. Автогрейдеры	21
1.2.7. Одноковшовые погрузчики	23
1.2.8. Экскаваторы-погрузчики	26
Глава 2. Научно-теоретические основы метода минимизации продолжительности рабочего цикла землеройных машин	29

2.1. Теоретические основы анализа продолжительности рабочего цикла землеройных машин.....	29
2.1.1. Продолжительность рабочего цикла в системе показателей оценки эффективности землеройных машин.....	29
2.1.2. Метод минимизации продолжительности рабочего цикла в системе расчетов землеройных машин.....	34
2.1.3. Структурные модели рабочего цикла землеройных машин....	39
2.1.4. Математические модели времени отдельных операций машины.....	43
2.1.5. Схема формирования математической модели времени рабочего цикла землеройной машины	48
2.2. Определение оптимальных параметров и выбор землеройных машин методом минимизации времени рабочего цикла.....	51
2.2.1. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров одноковшового экскаватора.....	51
2.2.2. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров бульдозера	61
2.2.3. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров рыхлителя.	67
2.2.4. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров бульдозера-рыхлителя.....	71
2.2.5. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров скрепера	74
2.2.6. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров автогрейдеров.....	79
2.2.7. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров одноковшовых погрузчиков.....	82
2.2.8. Математическая модель продолжительности рабочего цикла и определение параметров экскаватора-погрузчика	86
2.3. Определение параметров землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации.....	89
2.3.1. Формирование зависимостей связи между основными параметрами объектов техники.....	89
2.3.2. Определение оптимальных параметров машин в зависимости от условий эксплуатации	98
2.4. Выбор землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации. Пример расчета	112
2.5. Оценка коммерческой эффективности рационального использования машины. Пример расчета оценки эффективности.....	117
Заключение	124
Вопросы для самоконтроля	128
Литература	129

Учебное издание

БАЛОВНЕВ Владилен Иванович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И
ВЫБОР ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Учебное пособие

Редактор Н.П. Лапина

Подписано в печать

Формат 60×84/16

Печать офсетная

Усл. печ. л. 8,0

Уч.-изд. л. 6,6

Тираж 300 экз.

Заказ

Цена договорная

Ротапринт МАДИ (ТУ). 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64