

УДК 625.76.08

А.В. Семенов, С.И. Вахрушев, Е.О. Треногин

A.V. Semenov, S.I. Vakhrushev, E.O. Trenogin

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ОТДЕЛЬНЫХ РАБОЧИХ ОПЕРАЦИЙ МАШИН
ДЛЯ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ, СОСТАВЛЯЮЩИХ РАБОЧИЙ ЦИКЛ**

**RESEARCH OF MATHEMATICAL MODELS OF CERTAIN
WORKING OPERATIONS, WHICH ARE MAKING
UP MACHINE WORKING CYCLE**

Рассмотрены математические модели отдельных рабочих операций строительной машины. Представлены различные структурные модели машин для земляных работ. Проведено исследование метода минимизации продолжительности времени рабочего цикла строительной машины. Приведен график зависимости времени рабочего цикла от массы машины с целью определения тягового усилия техники. Показаны графики зависимости времени рабочего цикла $T_{ц}$ и производительности P от массы машины. Проведен анализ рабочих операций землеройных машин, таких как опускание рабочего органа на поверхность грунта, заглубление ножа рабочего органа в грунт, подъем рабочего органа с грунтом, перемещение грунта к месту его укладки, выгрузка грунта, холостой ход машины, подъем рабочего органа без грунта, переключение передач, торможение, а также разгон (вспомогательные операции).

Ключевые слова: математическая модель, структурная модель, время рабочего цикла, рабочая операция, оптимальные параметры, метод минимизации.

In the article, we review the mathematical models of certain working machine operations. We present various structural machine models for earthworks. We conduct the research of minimization method of time duration of work cycle time of construction machine. We show dependency diagram of work cycle time against machine weight for defining traction power of the equipment. The analysis of work operations of excavating machines such as is carried out: lowering of operating part on soil surface; burying of knife of operating part in soil; raising of operating part with soil; movement of soil to the place of its laying; soil unloading; idling of the machine; raising of operating part without soil; gear shift, braking, and also dispersal (auxiliary operations).

Keywords: mathematical model, structural model, work cycle time, working operation, optimized parameters, minimization method.

В современных условиях на рынке строительных машин для земляных работ потребитель желает приобрести машины высокого качества изготовления, которые будут осуществлять все потенциальные возможности, заложен-

ные конструктивно. Возникает потребность в технике, гарантирующей выполнение работ с наибольшим эффектом в конкретных условиях эксплуатации. Это обеспечивается за счет правильного подбора оптимальных параметров машины.

Однако существующие методы при определении начальных параметров не учитывают проявление всех эксплуатационных факторов, необходимы их развитие и дополнение. Отсутствует математическая модель, которая бы смогла обобщить многообразие параметров машины, а также взаимное влияние факторов, которые определяются условиями ее эксплуатации.

Для решения поставленной задачи необходимо наличие системы показателей, которые обеспечиваются за счет выбора и определения оптимальных параметров строительной машины.

Технико-экономические показатели представляются в виде функции времени рабочего цикла ($T_{ц}$) заданной машины для земляных работ [1].

Величина $T_{ц}$ устанавливает эффективность машины по рыночным показателям, зависит не только от удельной цены единицы продукции $C_{уд}$, а также от цены работы машины в единицу времени (машино-часа) $C_{м-ч}$:

$$C_{уд} = \frac{C_{м-ч} T_{ц}}{q}, \quad (1)$$

где $T_{ц}$ – время рабочего цикла машины, с; $C_{уд}$ – удельная цена единицы продукции, руб./м³; $C_{м-ч}$ – стоимость машино-часа, руб./ч; q – вместимость ковша, единица продукции, м², м³, кг.

Эффективность работы машины в единицу времени (в рублях) может быть определена по исходной рыночной цене единицы продукции (стоимость 1 м³ грунта), максимальной производительности и минимальной продолжительности времени рабочего цикла $T_{ц}$:

$$C = C_{уд} П = \frac{C_{уд} q}{T_{ц}}, \quad (2)$$

где $П$ – конструктивная производительность машины, определяемая как количество единиц продукции, выработанные за единицу времени, м³/ч; C – стоимость работы строительной техники в единицу времени, руб./ч.

Отсюда следует, что при уменьшении времени рабочего цикла, когда остальные параметры неизменны [см. формулу (2)], затраты на себестоимость единицы продукции и механизацию работ снижаются, следовательно, эффект от использования машины увеличивается. Таким образом, показатель времени рабочего цикла часто используется при расчете производительности строительной машины.

Основными технологическими операциями строительных машин для земляных работ являются рабочая операция, транспортировка грунта к месту выгрузки, холостой ход (порожний ход) и др. Однако не учитывается взаимовлияние технологических операций в ходе рабочего цикла. Это обстоятельство требует разработки обобщенной математической модели, соединяющей в единую зависимость все технические параметры машины от условий ее эксплуатации.

Математическая модель (ММ) показателя времени рабочего цикла ($T_{ц}$) описывается суммой времени выполнения отдельных операций рабочего процесса строительной техники.

Для машины с циклическим режимом работы математическая модель $T_{ц}$ представляется как отношение ММ работ сил сопротивления к ММ мощности:

$$T_{ц} = \sum t_i = \sum \frac{A_{сопр i}}{N_{опер i}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где t_i – время выполнения отдельной рабочей операции, с; $A_{сопр i}$ – работа сил i -го сопротивления при выполнении отдельной операции; $N_{опер i}$ – мощность, реализованная машиной, при выполнении i -й рабочей операций, Вт.

Значения оптимальной массы $m_{опт}$, энергонасыщенности $(N/m)_{опт}$, минимального времени рабочего цикла машины $T_{ц min}$ определяются при помощи метода минимизации математической модели времени рабочего цикла $T_{ц}$.

При установлении оптимальных параметров $m_{опт}$, $(N/m)_{опт}$ решается задача выбора машин для выполнения земляных работ из имеющейся в парке строительной техники, которая будет обеспечивать работу с максимальным эффектом. Выбор машины осуществляется по вышеуказанным оптимальным значениям, рассчитываемым методом минимизации метаматематической модели $T_{ц}$.

Данный метод реализуется последовательно и включает в себя следующие действия:

- определение места машины в технологическом процессе;
- установление структурной модели рабочего цикла;
- установление последовательности выполнения операций в структуре рабочего цикла с учетом возможности их совмещения и вероятности появления;
- составление математической модели для расчета времени отдельной операции;
- формирование математической модели для расчета всего времени рабочего цикла;
- анализ полученной функции;
- придание оптимальных значений взаимовлияющим факторам.

Структурные модели строительных машин для земляных работ.

При помощи исследования структурной модели (СМ) устанавливается математическая модель продолжительности рабочего цикла ($T_{ц}$). Рассмотрим различные структурные модели строительных машин для земляных работ [2].

1. СМ землеройной машины с *циклическим* рабочим процессом можно представить в виде суммы времени каждой отдельной рабочей операции:

$$T_{ц} = t_o + t_3 + t_k + t_{пд} + t_{пр} + t_b + t_x + t_{пд.х} + t_{всп}, \quad (4)$$

где t_o – время, затрачиваемое на опускания рабочего органа на поверхность грунта, с; t_3 – продолжительность операции заглубления ножа рабочего органа в грунт, с; t_k – время отделения грунта от разрабатываемой поверхности, с; $t_{пд}$ – продолжительность операции подъема рабочего органа с грунтом, с; $t_{пр}$ – время перемещения грунта к месту его укладки, с; t_b – продолжительность операции выгрузки грунта, с; t_x – время операции холостого хода, с; $t_{пд.х}$ – время, затрачиваемое на подъем рабочего органа без грунта, с; $t_{всп}$ – продолжительность переключения передач, торможения, разгона и других вспомогательных операций, с.

Все технологические операции по нахождению продолжительности рабочего цикла можно разделить на определяющие и вспомогательные.

Эффективность использования землеройно-транспортных машин определяется способностью быстро выполнять операции в комплексе в грунтах различной плотности с минимальными затратами ресурсов. При разработке прочного грунта наиболее важен этап заглубления, при медленном заглублении ножа в грунт время продолжительности цикла увеличивается, следовательно, снижается производительность. Это положение не учитывается при расчете производительности на основании известных ранее зависимостей¹.

Следовательно, выражение для определения полной продолжительности рабочего цикла землеройно-транспортной машины должно включать в себя продолжительность операции заглубления ножа рабочего органа в грунт.

Для бульдозера, скрепера и автогрейдера вводится коэффициент

$$T_{ц} = K_{всп} (t_k + t_3 \dots), \quad (5)$$

где $K_{всп}$ – коэффициент, учитывающий продолжительность вспомогательных операций ($t_{всп}$), который определяется по формуле

¹ Бульдозер: пат. 1155687 СССР/В.И. Боловнев, А.Б. Ермилов, А.Г. Савельев. № 3572839/29-03. Заявл. 04.04.83; опубл. 15.05.85. Бюл. № 18. – 4 с.

$$K_{\text{всп}} = 1 + t_{\text{всп}} / (t_k + t_3 + \dots). \quad (6)$$

Величину обычно принимают равной $K_{\text{всп}} = 1,2 \dots 1,25$ [4].

Причем можно заметить, что при $t_3 \rightarrow \infty$ время цикла $T_{\text{ц}} \rightarrow 0$.

2. СМ *многоцелевой* строительной машины для земляных работ с *циклическим* рабочим процессом представляет собой сумму технологических операций, выполняющихся каждым видом рабочего оборудования по отдельности:

$$T_{\text{ц}} = \sum p_i T_{\text{ц}i}, \quad (7)$$

где p_i – вероятность выполнения работ с i -м оборудованием, при выполнении всего объема работ принимаем $p_i = 1$; $T_{\text{ц}i}$ – продолжительность рабочего цикла i -го оборудования, с.

3. СМ землеройной машины с *непрерывным* рабочим процессом представляет из себя последовательность выполнения основной рабочей операции – копанье грунта многоковшовым рабочим органом – и вспомогательных операций (опускание, позиционирование рабочего органа и др.).

Структурная модель землеройной машины имеет вид

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{поз1}} + t_o + t_{\text{раз}} + t_{\text{пд.х}} + t_{\text{поз2}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{раз}}$ – время операции на разработку грунта, с; t_o – время опускания рабочего органа, с; $t_{\text{пд.х}}$ – продолжительность подъема рабочего органа, с; $t_{\text{поз1}}$ – продолжительность позиционирования машины на начальном этапе работы, с; $t_{\text{поз2}}$ – время позиционирования машины на конечном участке, с.

Множество технологических операции, прежде всего резание грунта ($t_{\text{раз}}$), транспортировка грунта к месту разгрузки ($t_{\text{т}}$), перемещения грунта ковшом ($t_{\text{пр}}$), осуществляются одновременно и выполняются одним рабочим органом, что говорит о равенстве времени выполнения каждой отдельной операции:

$$t_{\text{раз}} = t_{\text{рез}} = t_{\text{т}} = t_{\text{пр}}. \quad (9)$$

Рассмотренные выше структурные модели (4), (5), (8) универсальны и справедливы для различного типа сменных рабочих органов. Это означает, что не все технологические операции характерны для той или иной строительной машины.

При помощи структурных схем рабочего цикла строительной машины для земляных работ и математических моделей продолжительности выпол-

нения отдельных технологических операций можно составить ММ определения продолжительности всего рабочего цикла машины.

Продолжительность выполнения отдельной технологической операции в общем виде можно записать так:

$$T_{ц} = \frac{A_{сопрi}}{N_{опери}}, \quad (10)$$

где t_i – время отдельной рабочей операции, с; $A_{сопрi}$ – работа сил сопротивления при выполнении отдельных операций; $N_{опери}$ – мощность, реализованная машиной, при выполнении рабочих операций, Вт.

В свою очередь, работа сил сопротивления определяется как

$$A_{сопрi} = W_i \cdot l_i, \quad (11)$$

где W_i – сила сопротивления, возникающая в процессе выполнения технологической операции, Н; l_i – расстояние, которая преодолевает машина или рабочий орган при выполнении рабочей операции, м.

Мощность, реализованная машиной при выполнении рабочих операций, определяется по формуле

$$N_{опери} = P_{опери} \cdot v_{опери}, \quad (12)$$

где $P_{опери}$ – максимальная активная сила, развиваемая машиной на рабочем органе с целью преодоления сил сопротивления, Н; $v_{опери}$ – скорость выполнения технологической операции, которая определяется техническими ограничениями, м/с, причем $v_{опери} = 0,5-1,5$ м/с.

Математические модели отдельных рабочих операций. Рассмотрим на основании простейших зависимостей, как формируются ММ отдельных рабочих операций. Нахождение величин будем проводить последовательно, опираясь на уравнение (4).

1. Продолжительность операции опускания рабочего органа на поверхность грунта составит

$$t_o = \left(\frac{2h_o \cdot f_{со}}{g} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

где h_o – высота опускания рабочего органа, м; $f_{со}$ – коэффициент сопротивления опусканию рабочего органа, причем его зависимость имеет выражение

$f_{\text{co}} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}}$; η_{Σ} – обобщенный механический КПД системы опускания рабочего органа машины для земляных работ.

2. Продолжительность операции заглабления ножа рабочего органа в грунт составит

$$t_3 = \frac{b \cdot k_{\text{уд.з}} \cdot h_3 \cdot \delta}{k_{\text{сц}} \cdot mg \cdot v_3}, \quad (14)$$

где δ – толщина срезаемой стружки, м; $k_{\text{уд.з}}$ – удельное сопротивление заглаблению рабочего органа, Н/м²; b – ширина отвала (зуба, ковша) с ножами, м; h – средняя глубина резания, м; m – вес машины, кг; v_3 – скорость заглабления рабочего органа в грунт, $0,1 \leq v_3 \leq 0,2$, м/с; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с²; $k_{\text{сц}}$ – коэффициент тяговых и сцепных свойств движителя, причем

$$k_{\text{сц}} = (\varphi_c \cdot k_{\varphi} - f_x \pm i)(1 - \delta_3) \eta \cdot k_{\text{зд}} \delta_x,$$

здесь $k_{\text{зд}}$ – коэффициент буксования движителя при копании.

3. Продолжительность отделения грунта от массива определяется как

$$t_k = \frac{A_k}{N_k} = \frac{l_k \cdot (k_{\text{уд.к}} b h_k + f_k mg)}{k_{\varphi} \cdot mg \cdot v_k}, \quad (15)$$

где A_k – работа сил, препятствующих копанию; N_k – мощность, реализуемая машиной при копании, Вт; l_k – расстояние, которое преодолевает машина при копании, м; $k_{\text{уд.к}}$ – удельное сопротивление копанию рабочим органом, Н/м²; h_k – глубина копания рабочим органом, м; f_k – коэффициент, учитывающий сопротивление движения машины при копании; k_{φ} – коэффициент распределения массы строительной машины на мост ведущих колес; v_k – скорость машины при копании, причем $1 \leq v_k \leq 3$, м/с.

4. Продолжительность операции подъема рабочего органа с грунтом вычисляется по формуле

$$t_{\text{нд}} = \frac{h_{\text{нд}} \cdot (m_{\text{г}} + k_{\text{п}} m)}{m v_{\text{к}} k_{\text{сц}} \eta}, \quad (16)$$

где $h_{\text{нд}}$ – высота подъема рабочего органа вместе с грунтом, м; $m_{\text{г}}$ – масса вынимаемого грунта, $m_{\text{г}} = q \gamma_{\text{г}} / g$, кг; $\gamma_{\text{г}}$ – объемный вес грунта, Н/м³; $k_{\text{п}}$ –

коэффициент, учитывающий влияние массы машины от подъема рабочего органа; q – вместимость ковша, м^3 ; η – КПД механизма подъема.

5. Продолжительность транспортировки грунта к месту его укладки составит

$$t_{\text{пр}} = \frac{A_{\text{пр}}}{N_{\text{пр}}} = \frac{l_{\text{пр}} \cdot (m_{\text{г}} f_{\text{г}} + m f_{\text{пр}})}{k_{\text{сц}} \cdot m v_{\text{пр}}}, \quad (17)$$

где $A_{\text{пр}}$ – работа сил, препятствующих перемещению грунта; $m_{\text{г}}$ – масса транспортируемого грунта; $f_{\text{г}}$ – коэффициент учитывающий трение грунта; $l_{\text{пр}}$ – путь перемещения грунта, м; $N_{\text{пр}}$ – мощность, реализуемая машиной при выполнении операции перемещения грунта, Вт; $v_{\text{пр}}$ – скорость перемещения грунта, $1,5 \leq v_{\text{пр}} \leq 3,5$, м/с.

6. Продолжительность операции выгрузки грунта рассчитывается двумя способами:

а) свободная выгрузка (самосвальная) – под действием веса грунта:

$$t_{\text{в}} = \left(\frac{2h_{\text{в}} f_{\text{с}}}{n} \right)^{1/2}, \quad (18)$$

где $h_{\text{в}}$ – высота расположения рабочего органа, м; $f_{\text{с}}$ – коэффициент сопротивления при свободной выгрузке грунта, причем $1,15 \leq f_{\text{с}} \leq 1,2$;

б) принудительная выгрузка ковша скрепера:

$$t_{\text{в}} = \frac{4 f_{\text{гр.к}} \cdot g m_{\text{г}} \cdot l_{\text{к}}}{p_{\text{ж}} \cdot \pi d_{\text{ц}}^2 \cdot v_{\text{гц}}}, \quad (19)$$

где $m_{\text{г}}$ – масса грунта, поднимаемая ковшем, кг; $f_{\text{гр.к}}$ – коэффициент, учитывающий сопротивление движению грунта внутри ковша с учетом бокового трения, причем $f_{\text{гр.к}} > f_{\text{гр}}$; $l_{\text{к}}$ – ширина режущей кромки ковша, м; $d_{\text{ц}}^2$ – диаметр рабочих органов возвратно-поступательного действия (гидроцилиндров), отвечающих за принудительное опрокидывание днища и задней стенки ковша, м; $v_{\text{гц}}$ – скорость движения штока гидроцилиндра, $v_{\text{гц}} \leq \frac{1 \text{ м}}{\text{с}}$; $p_{\text{ж}}$ – давление рабочей жидкости, возникающее в гидросистеме механизма выгрузки, $\text{Н}/\text{м}^2$.

7. Продолжительность технологической операции порожнего хода машины для земляных работ:

$$t_x = \frac{A_x}{N_x} = \frac{l_x \cdot f_x \cdot mg}{k_{\text{цт}} N}, \quad (20)$$

где A_x – работа сил сопротивления при порожнем (обратном) ходе машины; f_x – коэффициент сопротивления движению машины на порожнем ходу; l_x – дальность порожнего хода, м; N_x – мощность, развиваемая машиной при операции порожнего хода, Вт; N – мощность двигателя машины, Вт.

8. Время на подъем пустого рабочего органа без грунта:

$$t_{\text{пд.х}} = \frac{h_{\text{пд}} \cdot k_{\text{п}}}{\eta \cdot v_{\text{к}} k_{\text{цт}}}, \quad (21)$$

где $h_{\text{пд}}$ – высота подъема рабочего органа без грунта, м; $k_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий влияние массы машины от подъема рабочего органа.

Время, требуемое на выполнение вспомогательных операций ($t_{\text{всп}}$) торможения, разгона, позиционирования и т.д., определяется эмпирическим путем и занимает всего 5 % от времени основных рабочих операций.

Рассмотрим пример определения времени рабочего цикла бульдозера, основанный на операциях, рассмотренных выше.

Структурную модель бульдозера запишем как

$$T_{\text{ц}} = t_3 + t_{\text{пр}} k_{\text{всп}} + t_x = \frac{bk_{\text{уд.з}} \cdot h_3 \delta}{mg \cdot k_{\text{цт}} V_3} + \frac{l_{\text{пр}} (m_{\text{г}} f_{\text{г}} + m f_{\text{пр}})}{v_{\text{пр}} m \cdot k_{\text{цт}}} k_{\text{всп}} + \frac{f_x mg \cdot l_x}{k_{\text{цт}} N}. \quad (22)$$

Рабочий цикл бульдозера включает следующие последовательно выполняемые технологические операции заглабления ножа отвала в грунт (t_3), перемещения грунта к месту его укладки ($t_{\text{пр}}$) и холостой (обратный) ход (t_x) [4].

Построим график зависимости времени рабочего цикла $T_{\text{ц}}$ бульдозера от его массы и график зависимости производительности Π бульдозера от массы бульдозера (рисунок).

Графические зависимости имеют нелинейный характер и показывают, что с уменьшением мощности (тягового усилия бульдозера) наблюдается увеличение времени рабочего цикла $T_{\text{ц}}$ бульдозера, а это, в свою очередь, приводит к уменьшению производительности машины. На графиках кривые зависимостей продолжительности рабочего цикла $T_{\text{ц}}$ бульдозера и производительности Π бульдозера имеют точки экстремумов. При оптимальных значениях параметров массы и мощности бульдозера продолжительность цикла имеет минимальное значение, а производительность соответствует максимальному значению.

Вышеописанные графики зависимостей можно условно разделить на три зоны:

1) $m < m_{\text{опт}}$ – масса машины меньше силы тяги: поскольку сила тяги мала, то большее время затрачивается на разработку грунта, следовательно, время цикла растет, а производительность снижается;

2) $m = m_{\text{опт}}$ – зона оптимальной массы машины и силы тяги: мощности достаточно для разработки и транспортирования грунта с оптимальной массой – максимальная производительность, время цикла минимальное.

3) $m > m_{\text{опт}}$ – значение массы больше оптимальной величины: при постоянной мощности двигателя происходит увеличение продолжительности холостых и других перемещений, это является причиной снижения производительности.

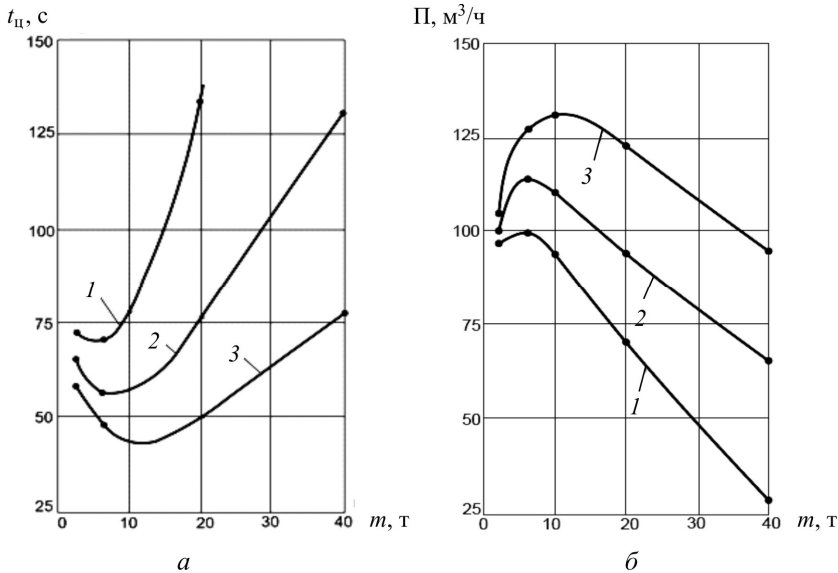


Рис. График зависимости рабочего цикла (а) и производительности (б) бульдозера от массы при разработке грунта прочностью 0,1 МПа: 1 – мощность 50 кВт; 2 – мощность 100 кВт; 3 – мощность 200 кВт; длина транспортирования составляет 90 м

Рациональная масса бульдозера определяется выражением

$$m_{\text{опт}} = \frac{1000k_{\text{уд.б}}k_f N}{l_x v_p \gamma_{\text{пр}} g}, \quad (23)$$

где k_f – коэффициент, учитывающий тягово-сцепные свойства машины, $k_f = 2,5-3$; $k_{\text{уд.б}}$ – удельное сопротивление грунта копанию отвалом; N –

мощность бульдозера, Вт; l_x – дальность холостого хода, $l_x \leq 100$ м; v_p – скорость резания, м/с; $\gamma_{пр}$ – объемный вес призмы волочения впереди отвала бульдозера, Н/м³.

Оптимальные массы других машин для земляных имеют схожие зависимости [4].

Таким образом, время на выполнение технологических операций t_i и время цикла $T_{ц}$ являются важнейшими показателями эффективности, зависящими от множества факторов.

Таким образом, предложенный в статье метод разработки математических моделей отдельных рабочих операций машин для земляных работ, составляющих рабочий цикл, позволяет более обоснованно учитывать влияние факторов, определяющих условия эксплуатации машины.

Применение метода минимизации времени рабочего цикла машины в структуре существующих расчетов может осуществляется разными путями, в зависимости от исходной информации и поставленных задач, что говорит об универсальности метода.

Для обеспечения работы с максимальным эффектом (максимальная производительность при минимальном времени цикла) необходимо установление оптимальных параметров машины, которые важны при выборе машин для земляных работ. Комплексная механизация земляных работ, в свою очередь, представляет собой высокий потенциал интенсификации строительства.

Обеспечение высокого показателя эффективности рациональнее осуществлять при помощи увеличения мощности, но сохранении неизменной оптимальной массы машины для земляных работ.

При уменьшении времени рабочего цикла, когда остальные параметры неизменны, затраты на себестоимость единицы продукции и механизацию работ снижаются, а следовательно, эффект от использования машины увеличивается.

Для повышения точности нахождения времени рабочего цикла машины необходимо продолжительность выполнения вспомогательных операций учитывать с помощью специальных коэффициентов.

Список литературы

1. Земляные работы в строительстве [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.earthwork.ru> (дата обращения: 10.09.2015).

2. Землеройные и планировочные машины [Электронный ресурс]. – URL: http://www.megastroika.biz/index/zemlerojnye_i_planirovochnye_mashiny/0-359 (дата обращения: 14.09.2015).

3. Глебов В.Д. Повышение долговечности и снижение затрат энергии бульдозеров // Вестник Псков. гос. ун-та. – 2014. – № 5. – С. 166–169.

4. Баловнев В.И. Определение оптимальных параметров и выбор дорожно-строительных машин методом анализа четвертой координаты: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. автодор. гос. техн. ун-та, 2014. – 180 с.

Получено 17.10.2016

Семенов Артем Владимирович – студент, строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: artem_player@mail.ru;

Вахрушев Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника», строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: spstf@pstu.ac.ru.

Треногин Евгений Олегович – магистрант, строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: klerk059@mail.ru.