

Численное моделирование производительности экскаваторов

К.т.н., доцент Г.Я. Булатов;
инженер А.А. Терехов,*

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: выбор экскаваторов; прямая лопата; эксплуатационная производительность; ширина забоя.

Вызываемая общим развитием технического прогресса необходимость прогнозирования технологических процессов требует нахождения связей между параметрами этих процессов. Однако процесс может протекать в различных режимах, и представляется весьма важным отыскание области определяющих параметров, отвечающих оптимальному режиму протекания технологического процесса. Эти проблемы в той или иной степени освещались во всем списке литературы [1-15]. Оптимизация технологических процессов несет с собой существенный экономический эффект уже только потому, что не требует каких-либо дополнительных капиталовложений для реализации. Так, например, только за счет изменения на несколько метров ширины забоя, разрабатываемого экскаватором, можно существенно увеличить производительность землеройных машин. Учитывая же громадные объемы землеройных работ (по данным академика А.Л. Яншина эти объемы в мире составляют около $60 \text{ км}^3/\text{год}$ (объемы вулканической деятельности – 16)), общий эффект от оптимизации будет значительным. И, если не считать затрат на постановку задачи и соответствующие расчеты, все это легко достигается. Ниже рассматривается аналогичная задача на примере экскаватора «прямая лопата».

1. Критерии выбора экскаваторов

Для выбора оптимального варианта используем обобщенные критерии [1,2,3]. Критерии выбора экскаватора типа «прямая лопата» следующие:

IV-1: по объему ковша, т.е. $q_e \geq q_T$,

где q – геометрический объем ковша (возможный и требуемый).

Таблица 1

Объем выемки V_T , м ³ :	Рекомендуемый объем ковша экскаватора q_T , м ³ :
до 2500	0,4...0,65
до 5000	1...1,25
до 25000	1,6...2,5

Кроме того, рекомендуется выполнение следующих критериев:

III-1: по высоте копания грунта, т.е. $H_B \geq H_T$ при $H_B = \eta_{HB} \cdot H_{HB}$ и $H_B = H_P \cdot \eta_P$ и $H_T = H$,

где H_{HB} – высота напорного вала экскаватора; H – требуемая высота забоя (яруса) разработки грунта;

η_{HB} – коэффициент использования высоты напорного вала [4];

H_P и η_P – высота резания (копания) грунта и коэффициент ее использования (0,85...1,0), для сыпучих грунтов он не ограничен;

III-2: по высоте наполнения ковша, т.е. $H_B \geq H_T$, при $H_T \geq H_{HK}$,

где H_{HK} – высота наполнения ковша [2];

III-3: по высоте выгрузки грунта, т.е. $H_{BB} \geq H_{TB}$ при $H_{TB} = H_{mp} + \Delta H + \Delta h$,

где H_{BB} – высота выгрузки при требуемом радиусе выгрузки R_{BB} , по $H_{BB} = f(R_{BB})$; H_{mp} – высота кузова автосамосвала; ΔH – разница в уровнях стоянки машин; Δh – запас высоты (0,5...1м).

Выбор и расчеты числа самосвалов приведены в [3], [5] и [2].

2. Методика расчета эксплуатационной производительности и оптимальной ширины забоя одноковшового экскаватора

Рассматриваем работу экскаватора «прямая лопата» в боковом ярусном забое при погрузке грунта на автосамосвалы [4], [6]. Здесь одним из основных параметров является ширина забоя B , которая и влияет на производительность экскаватора. При этом существует оптимальная ширина забоя, отклонение от которой,

Булатов Г.Я., Терехов А.А. Численное моделирование производительности экскаваторов

как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, ведет к снижению производительности экскаватора. Отыскание оптимальной ширины забоя, обеспечивающей максимум производительности, и является целью приведенного решения.

Техническую часовую производительность экскаватора запишем в виде [7]:

$$\Pi^T = \frac{Q_{II}}{T_{II}}, \quad (1)$$

где Q_{II} – объем грунта в ковше, приведенный к естественной плотности в выемке [4];

T_{II} – продолжительность цикла экскавации.

$$Q_{II} = q \cdot K_3, \quad (2)$$

при

$$K_3 = (K_H / K_P) \cdot K_C \cdot K_\alpha \cdot \eta_B \cdot \dots, \quad (3)$$

где q – геометрический объем ковша; K_3 – коэффициент заполнения ковша грунтом; K_H – коэффициент наполнения; K_P – коэффициент разрыхления грунта; K_C – коэффициент сохранности грунта при переносе [4]; K_α – коэффициент, учитывающий влияние уклона местности; η_B – коэффициент эффективности выгрузки ($\eta_B \cong 1,0$).

Эксплуатационная производительность:

$$\Pi^Э = \Pi^T \cdot K_B. \quad (4)$$

Коэффициент использования рабочего времени K_B для экскаватора «прямая лопата» можно уточнить по [7,8,4,1,6]. Здесь его находим по формуле [9]:

$$K_B = \frac{1 - \sum \theta_j}{1 + \sum \theta_i}, \quad (5)$$

где θ_i – относительная производительность основных работ;

θ_j – относительное время выполнения прочих работ j -го рода.

$$\theta_j = \frac{T_j}{T_{oj}}, \quad (6)$$

где T_j – время выполнения прочей работы j ;

T_{oj} – промежуток полного времени работ, к которому относится T_j .

$j = 1$ – ежечасный отдых оператора, например: $T_1=5\text{мин}$, $T_{o1}=1\text{час}$;

$j = 2$ – полусменный отдых: $T_2=5\text{мин}$, $T_{o2}=4\text{часа}$;

$j = 3$ – ежесменный отдых: $T_3=5\text{мин}$, $T_{o3}=8\text{часов}$.

$$\theta_i = \frac{\Pi^T}{\Pi_i}, \quad (7)$$

где Π_i – условная производительность выполнения прочих работ i -го вида.

$$P_i = \frac{W_i}{T_{ni}}, \quad (8)$$

где T_{ni} – абсолютное время выполнения прочей i -й работы;

W_i – объем основных работ, выполненных до начала выполнения прочей i -й работы.

$i = 1$ – учет времени на замену автомобилей-самосвалов перед экскаватором:

$$T_{n1} = T_{МП}, \quad (9)$$

$$W_1 = Q_{Ц} \cdot m, \quad (10)$$

где $T_{МП}$ – время маневра самосвала перед погрузкой (0,5...2 мин), включая перерывы в подаче самосвалов;

$Q_{Ц}$ – объем грунта в ковше экскаватора, приведенный к плотному состоянию выемки;

m – число ковшей с грунтом, подаваемых на один самосвал.

$i = 2$ – учет времени на переход экскаватора с одной стоянки на другую:

$$T_{n2} = T_{ПЕР}, \quad (11)$$

$$W_2 = l_{П} \cdot H \cdot B, \quad (12)$$

где $T_{ПЕР}$ – время, затрачиваемое на одну передвижку экскаватора (1...4 мин); W_2 – объем грунта, разрабатываемый с одной стоянки экскаватора; $l_{П}$ – длина передвижки экскаватора; B – ширина забоя; H – высота забоя.

$i = 3$ – переход на другой забой; $i = 4$ – переход на другой ярус и т.д.

$$B = 2 \cdot (2 \cdot R \cdot \sin \beta / 2 - a), \quad (13)$$

где R – средний расчетный радиус копания (при заборе грунта);

β – средний расчетный угол поворота экскаватора на выгрузку (рад).

Частная ширина рабочей зоны экскаватора:

$$a = a_0 + a_T \text{ при } a_0 = H \cdot \operatorname{ctg} \alpha \text{ и } a_T = b_T / 2 + \Delta a_T, \quad (14)$$

где a_0 – эксцентриситет забоя; a_T – расстояние от границы забоя до оси транспортного хода; b_T – ширина транспортного средства; Δa_T – запас ширины (0,5...1,0 м); α – расчетный угол откоса элемента забоя (50...75°).

$$T_{Ц} = K_{Ц} \cdot \beta + T_0. \quad (15)$$

Ниже приведены справочные эмпирические зависимости [4]:

$$\begin{aligned} T_0 &= K_{ТР} \cdot 2,7 \cdot \sqrt[4]{M_{Э}} + 2 + 0,5 \cdot R_P, \text{ с} \\ K_{Ц} &= 0,45 \cdot R_P, \text{ с/рад} \\ l_{П} &= 0,5 \cdot H_{HB}, \text{ м} \\ H &= \eta_{HB} \cdot H_{HB}, \text{ м} \\ H_{HB} &= 1,5 \cdot \sqrt[4]{M_{Э}}, \text{ м} \\ R &= R_B - 0,5 \cdot l_{П}, \text{ м} \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь $K_{ТР}$ – коэффициент трудности разработки грунта (0,55...1,0); $M_{Э}$ – масса экскаватора, т; R_P – максимальный радиус копания грунта; η_{HB} – относительная высота забоя (1,0...1,2); H_{HB} – высота напорного вала на стреле экскаватора; R_B – максимальный радиус выгрузки; H – рекомендуемая высота забоя (может иметь и другую величину, например полученную из условия разбивки выемки на отдельные ярусы разработки, при этом расчетная высота забоя будет принята в соответствии с конкретной разбивкой) [4].

Из геометрических соотношений имеем предельные величины для ширины забоя (теоретический максимум и технологический минимум).

$$B_{MAX}^{TEOP} = \frac{2}{3} \left[2 \cdot (\sqrt{R_{CT}^2 - l_{II}^2} + a_O) - a \right], \quad (17)$$

$$B_{MIN}^{TEXH} = \frac{m \cdot Q_{II}}{l_{II} \cdot H}, \quad B_{MIN} = b_{\text{КОВША}}, \quad (17a)$$

где R_{cm} – максимальный радиус копания грунта на уровне стоянки экскаватора.

При малых B рекомендуется проверить, не касается ли платформа экскаватора откосов забоя. Проверка легко выполняется графически на плане забоя или по условию:

$$B_{MIN}^{ГЕОМ} = 2 \cdot r_{XB}, \quad (17б)$$

где r_{XB} – радиус хвостовой части экскаватора.

Абсолютная максимальная ширина забоя (физический максимум) и её технологический максимум

$$B_{MAX}^{ФИЗ} = \sqrt{R_{CT}^2 - l_{II}^2} + R_B - a_T \quad (17в)$$

$$B_{MAX}^{TEX1} = 2\sqrt{R_{CT}^2 - l_{II}^2} \quad \text{или} \quad B_{MAX}^{TEX2} = 2R_{CT}, \quad (17г)$$

где R_e – максимальный радиус выгрузки.

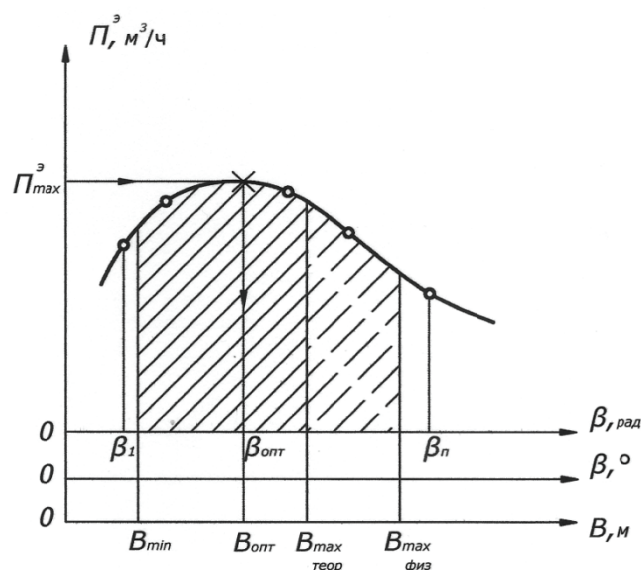


Рисунок 1. График функции $P^3=f(\beta, B)$

Задавая ряд величин β_i , находят соответствующие им производительности P^3 и строят график функции $P^3=f(\beta, B)$, представленный на рис. 1, по которому находят оптимальный угол поворота экскаватора β_{opt} , соответствующий максимуму эксплуатационной производительности P_{max}^3 . По величине β_{opt} находят остальные технологические параметры, в том числе оптимальную ширину забоя B_{opt} и уточняют расчетом величину P_{max}^3 [4]. Схема оптимального забоя представлена на рис. 2.

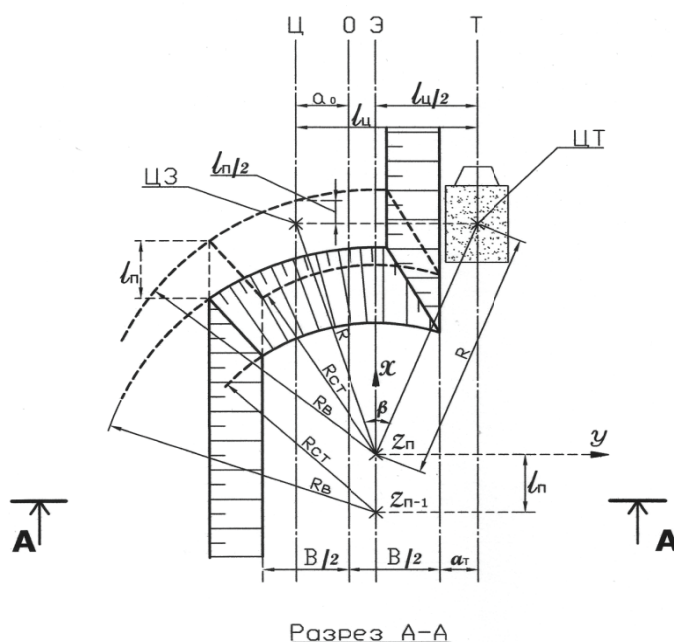


Рисунок 2. Схема оптимального забоя

3. Исходные данные для расчета

Наименование и группа грунта: супесь с примесью щебня, гравия, гальки в объеме до 10%, группа II; $m_k=7 \text{ шт.}$; $T_{МП} = 30 \text{ с}$; $T_{ПЕР} = 90 \text{ с}$; $V_T = 56670 \text{ м}^3$; $\rho_{ЕСТ} = 1850 \text{ кг/м}^3$; размеры котлована по низу $28 \text{ м} \times 40 \text{ м}$; $H_k=13,61 \text{ м}$, котлован разбит на 3 яруса, максимальная высота яруса $4,775 \text{ м}$.

Был выбран экскаватор Э-2505 (прямая лопата с гибкой подвеской рабочего оборудования).

Характеристики выбранного по [3] экскаватора приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Показатель	Э-2505
Емкость ковша, м^3	3,2
Длина стрелы, м	8,6
Длина рукояти, м	6,1
Угол наклона стрелы, град	45
Наибольший радиус копания, м	12,0
Наибольшая высота разгрузки, м	6,4
Радиус разгрузки при наибольшей высоте разгрузки, м	10,2
Наибольший радиус разгрузки, м	10,8
Высота копания при наибольшем радиусе разгрузки, м	3,5
Наибольшая высота копания, м	9,0
Глубина копания ниже уровня стоянки, м	2,8
Радиус копания на уровне стоянки, м	7,2
Масса экскаватора (конструктивная), т	94
Продолжительность рабочего цикла при угле поворота 90° , с	22,0

По III-1: $9,0,85 \geq 4,775 \text{ м}$, условие выполняется (для супеси $\eta_p=0,85$).

По III-2: $4,775 \geq 3,5 \text{ м}$, условие выполняется (при $q = 3,2 \text{ м}^3$, для грунта II категории $H_{нк} = 3,5 \text{ м}$).

По III-3: $6,4 \geq 3,46+0+1 = 4,46 \text{ м}$, условие выполняется.

4. Расчеты и результаты

По формуле (3) $K_3 = (1, 1/1, 15)^{1*1*1} = 0,95$.

$K_H=1,1$, $K_P=1,15$, $K_C=1$, $K_\alpha=1$.

По формуле (2) $Q_u = 3,2*0,95 = 3,04 \text{ м}^3$.

$$j=1: \theta_1 = \frac{T_1}{T_{o1}} = \frac{5}{60} = 0,08.$$

$$j=2: \theta_2 = \frac{T_2}{T_{o2}} = \frac{5}{240} = 0,02.$$

$$j=3: \theta_3 = \frac{T_3}{T_{o3}} = \frac{5}{480} = 0,01.$$

$i=1$: по формуле (9) $T_{п1}=T_{МП} = 30 \text{ сек}$.

По формуле (10) $W_1 = 3,04 * 7 = 21,28 \text{ м}^3$.

По формуле (8) $\Pi_1 = 21,28/30=0,71 \text{ м}^3/\text{с}$.

$i=2$: по формуле (11) $T_{п2}=T_{ПЕР} = 90 \text{ сек}$.

По формуле (14): $a = 2,66 + 2,40 = 5,06 \text{ м}$,

$$\text{при } a_0 = 4,67 * 0,57 = 2,66 \text{ м}$$

$$a_T = 3,787/2 + 0,5 = 2,40 \text{ м.}$$

По формуле(16): $T_0 = 1 * 2,7 * \sqrt[4]{94} + 2 + 0,5 * 12 = 16,4 \text{ с;}$

$$K_{II} = 0,45 * 12 = 5,4 \text{ с/рад;}$$

$$l_{II} = 0,5 * 4,66 = 2,34 \text{ м;}$$

$$H = 1 * 4,67 = 4,67 \text{ м;}$$

$$H_{HB} = 1,5 * \sqrt[4]{94} = 4,67 \text{ м;}$$

$$R = 10,8 - 0,5 * 2,34 = 9,63 \text{ м.}$$

По формуле(17) $B_{MAX}^{TEOP} = \frac{2}{3} \left[2 \cdot (\sqrt{7,2^2 - 2,34^2} + 2,66) - 5,06 \right] = 5,8 \text{ м}$

По формуле(17а) $B_{MIN}^{TEXH} = \frac{7 \cdot 3,04}{2,34 \cdot 4,67} = 2,0 \text{ м}$

По формуле(17в): $B_{MAX}^{ФИЗ} = \sqrt{7,2^2 - 2,34^2} + 10,8 - 2,4 = 15,2 \text{ м;}$

$$B_{MAX}^{TEX} = 2 \cdot \sqrt{7,2^2 - 2,34^2} = 13,6 \text{ м.}$$

Таблица 3. Зависимость $\Pi^2=f(\beta, B)$

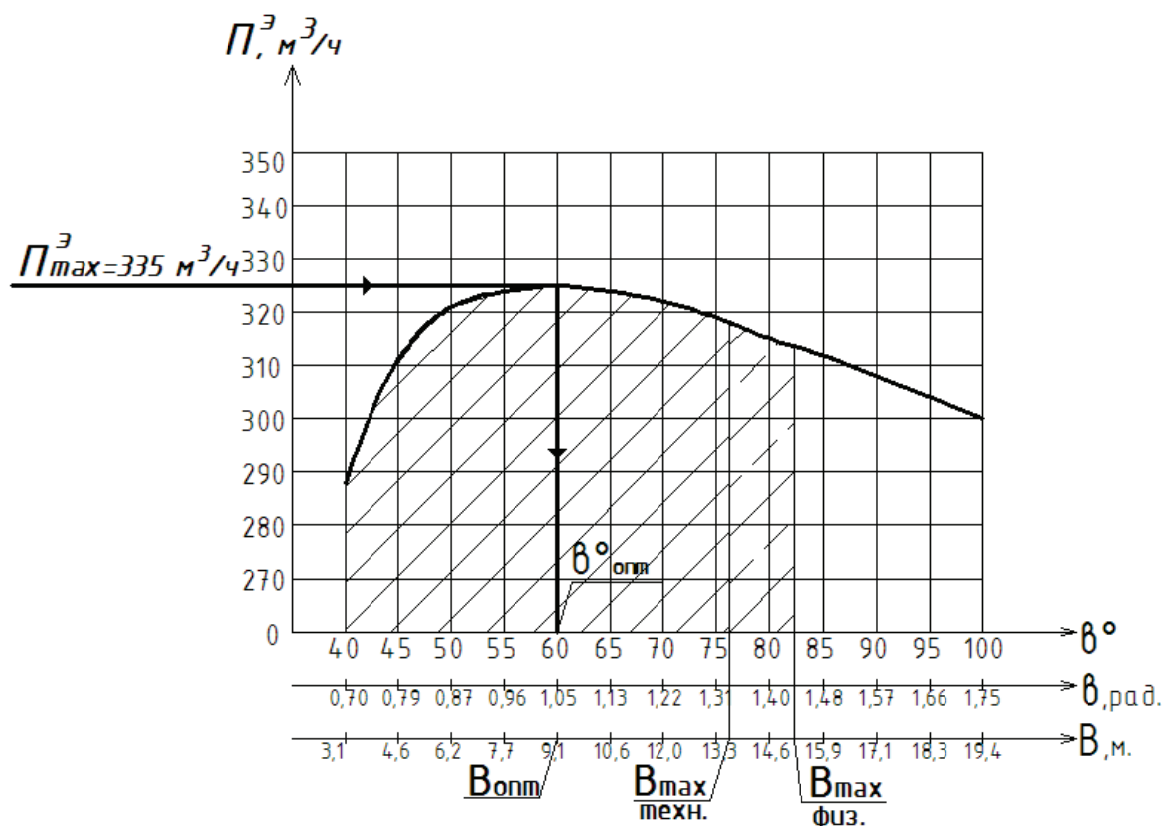
$\Pi_3, \text{ м}^3/\text{ч}$	$\Pi_T, \text{ м}^3/\text{с}$	$T_{ц, \text{ с}}$	K_B	Θ_1	Π_2	Θ_2	$\Sigma \theta$	$B, \text{ м}$	$\sin \beta/2$	β°	$\beta, \text{ рад}$
298	0,151	20	0,550	0,212	0,370	0,407	0,620	3,1	0,342	40	0,698
321	0,147	21	0,605	0,207	0,560	0,263	0,470	4,6	0,383	45	0,785
331	0,144	21	0,638	0,203	0,746	0,193	0,396	6,2	0,423	50	0,873
334	0,141	22	0,659	0,198	0,929	0,152	0,350	7,7	0,462	55	0,960
335	0,138	22	0,675	0,194	1,107	0,124	0,319	9,1	0,500	60	1,047
334	0,135	23	0,687	0,190	1,281	0,105	0,295	10,6	0,537	65	1,134
332	0,132	23	0,697	0,186	1,451	0,091	0,277	12,0	0,574	70	1,222
329	0,130	23	0,705	0,182	1,615	0,080	0,263	13,3	0,609	75	1,309
325	0,127	24	0,712	0,179	1,774	0,072	0,250	14,6	0,643	80	1,396
322	0,125	24	0,718	0,175	1,927	0,065	0,240	15,9	0,676	85	1,484
318	0,122	25	0,723	0,172	2,074	0,059	0,231	17,1	0,707	90	1,571
314	0,120	25	0,728	0,169	2,215	0,054	0,223	18,3	0,737	95	1,658
310	0,118	26	0,732	0,166	2,349	0,050	0,216	19,4	0,766	100	1,745

Проведем анализ оптимальных значений параметров $T_{\text{ПЕР}}, T_{\text{МП}}, m_K$.

Для анализа m_K построим графики зависимости $\Pi^2=f(m_K)$ при $T_{\text{ПЕР}}=60;90;120;150 \text{ с.}$, $T_{\text{МП}}=30 \text{ с.}$ и при $T_{\text{МП}}=30;60;90;120 \text{ с.}$, $T_{\text{ПЕР}}=90 \text{ с.}$

Для анализа $T_{\text{ПЕР}}$ построим графики зависимости $\Pi^2=f(T_{\text{ПЕР}})$ при $m_K=1;2;3;4;5;6;7;8;9;10$, $T_{\text{МП}}=30 \text{ с.}$ и при $T_{\text{МП}}=0;30;60;90;120 \text{ с.}$, $m_K=7$.

Для анализа $T_{\text{МК}}$ построим графики зависимости $\Pi^2=f(T_{\text{МК}})$ при $m_K=1;2;3;4;5;6;7;8;9;10$, $T_{\text{ПЕР}}=90 \text{ с.}$ и при $T_{\text{ПЕР}}=0;60;90;120;150 \text{ с.}$, $m_K=7$.

Рисунок 3. Зависимость $P^3=f(\beta, B)$

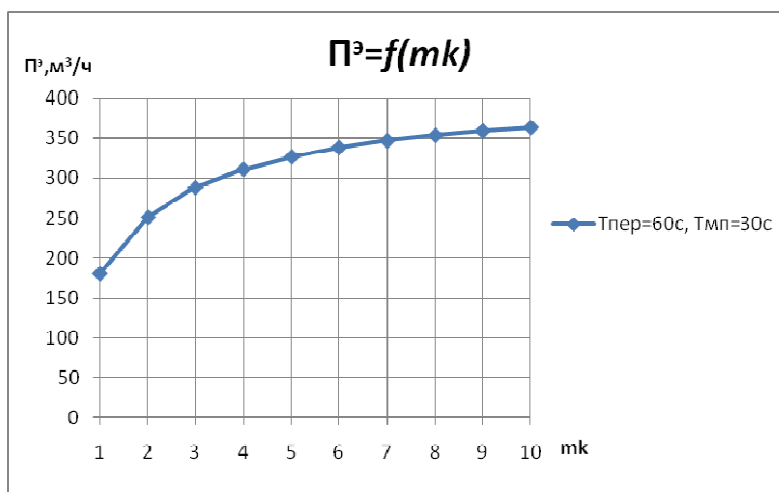
Для каждой точки графиков необходимо провести оптимизацию ширины забоя, чтобы эксплуатационная производительность была максимальна для данных параметров точки. Оптимизация ширины забоя выполняется автоматически с помощью программы Microsoft Excel, построение в ней графиков выполняется тоже автоматически.

Пример построения одного графика (например, $P^3=f(m_k)$ при $T_{\text{пер}}=60$ с. и $T_{\text{мп}}=30$ с.) с оптимизацией ширины забоя в каждой точке графика приведен ниже.

Расчет ширины забоя ведется в таблице, аналогичной табл. 3, только в первой колонке добавлена еще одна ячейка, в которой задана функция =MAX (первое значение в колонке; последнее значение в колонке) которая определяет максимальное значение P^3 . Так проводится расчет для каждой точки графика ($m_k=1;2;3;4;5;6;7;8;9;10$). Значения P^3_{max} сводятся в таблицу (пример – табл. 4) по значениям которой строится $P^3=f(m_k)$ (рис. 4).

Таблица 4.

Тпер=60 сек	
Тмп=30 сек	
Пэ	mk
181	1
251	2
289	3
312	4
327	5
339	6
347	7
354	8
359	9
364	10

Рисунок 4. График $P^3=f(m_k)$ при $T_{\text{пер}}=60$ с. и $T_{\text{мп}}=30$ с.

Далее проводим аналогичные операции при других значениях $T_{\text{ПЕР}}=90;120;150$ с. и сводим полученные графики в один, см. рис. 5.

График на рис. 6 построен при $T_{\text{ПЕР}}=90$ с.=const. и $T_{\text{МП}}=30;60;90;120$ с.

Аналогичным образом выполняются графики $\Pi^3=f(T_{\text{ПЕР}})$ и $\Pi^3=f(T_{\text{МК}})$, они приведены ниже (см. рис. 7,8 и рис. 9,10).

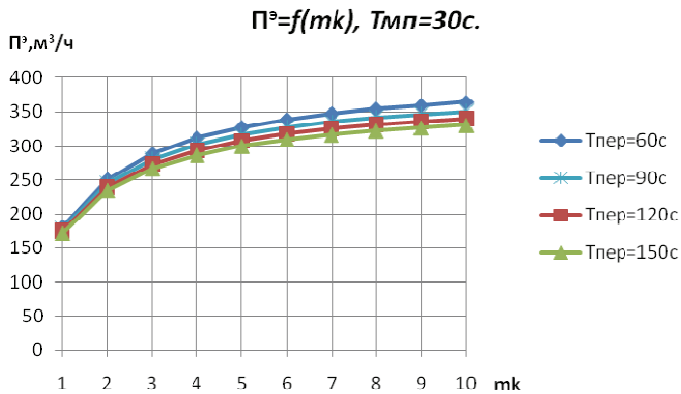


Рисунок 5. $\Pi^3=f(m_k)$ при $T_{\text{МП}}=30$ с.

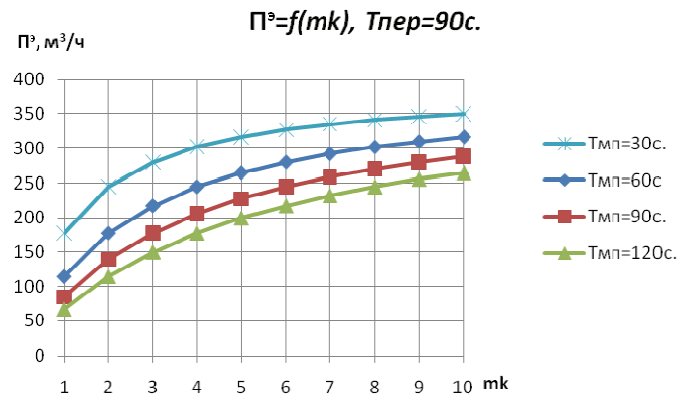


Рисунок 6. $\Pi^3=f(m_k)$ при $T_{\text{ПЕР}}=90$ с.

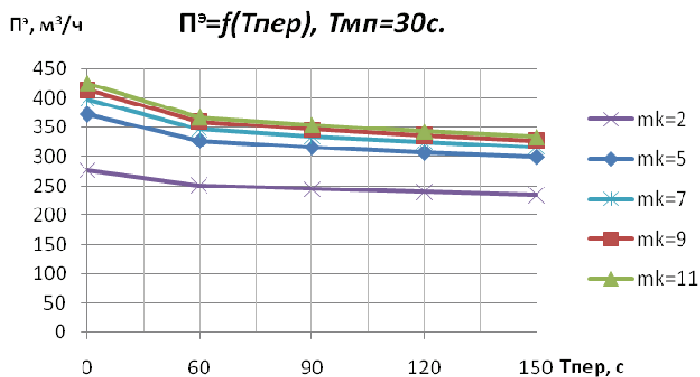


Рисунок 7. $\Pi^3=f(T_{\text{ПЕР}})$ при $T_{\text{МП}}=30$ с.

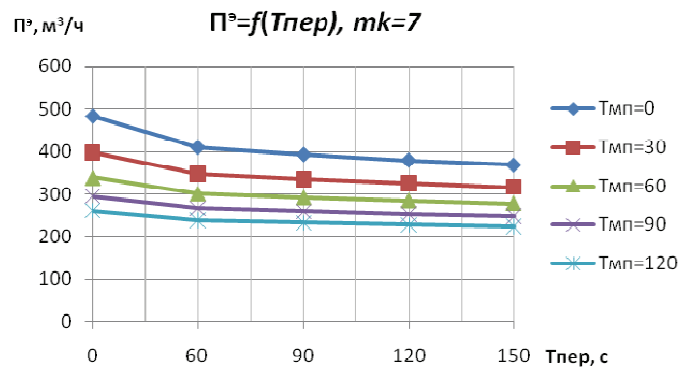


Рисунок 8. $\Pi^3=f(T_{\text{ПЕР}})$ при $m_k=7$

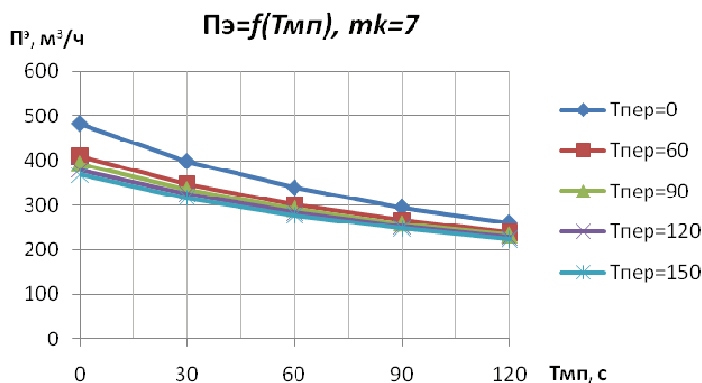


Рисунок 9. $\Pi^3=f(T_{\text{МП}})$ при $m_k=7$

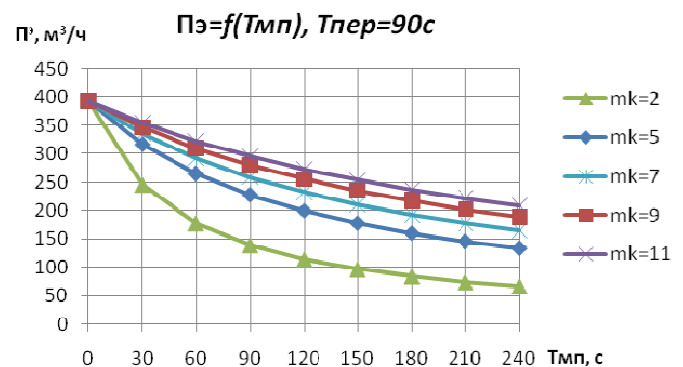


Рисунок 10. $\Pi^3=f(T_{\text{МП}})$ при $T_{\text{ПЕР}}=90$ с.

5. Выводы и рекомендации

В результате проделанной работы было получено 6 графиков, которые наглядно показывают связь параметров экскавации $T_{\text{ПЕР}}$, $T_{\text{МП}}$, m_k .

Из рис. 5 и 6 можно однозначно утверждать, что $m_k=7$ является оптимальным для максимальной эксплуатационной производительности с учетом технико-экономического обоснования дальнейшего увеличения m_k (мы получаем незначительный прирост производительности). Из этого следует, что выбор автосамосвала должен осуществляться исходя из его вместимости ($m_k=7$).

Из рис. 6 и 10 видно, что $m_k=7$ соответствует довольно высокому значению Π^3 , особенно в интервале $T_{\text{МП}} \leq 30$ с. При этом дальнейшее уменьшение $T_{\text{МП}}$ дает значительное увеличение Π^3 (снижение $T_{\text{МП}}$ от 30 с до 0 с дает увеличение Π^3 на $25 \text{ м}^3/\text{ч}$). Уменьшение $T_{\text{ПЕР}}$ тоже дает значительный результат ($T_{\text{ПЕР}} = 20\text{-}30$ с).

Полученные графики также дают возможность оценить возможность повышения эксплуатационной производительности одноковшовых экскаваторов типа «прямая лопата» при различных условиях производства работ, а также продолжить оптимизацию экскавации. Данная методика расчета также позволяет создать программу автоматизированного расчета максимальной эксплуатационной производительности экскаватора при конкретных условиях производства работ.

Литература:

1. Булатов Г. Я. Введение в общую теорию технологий (на примере строительства): Учеб. пособие. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003. 175 с.
2. Галузин В. М. Телешев В. И. Выбор строительных машин для производства земляных работ: Учеб. Пособие / ЛПИ. Л., 1987. 84 с.
3. Телешев В. И., Казанцев Б. Э., Птухина И. С. Принципы выбора системы строительных машин и определение их производительности // Гидротехническое строительство. 2000. №2. С. 24–28.
4. Булатов Г. Я. Технология возведения грунтовых плотин: Учеб. пособие / Под ред. В.И. Телешева. СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1994. 92 с.
5. Булатов Г. Я. Обобщенные критерии оптимального выбора технологий и машин // Инженерно-строительный журнал. 2009. №1. С. 32–39.
6. Зерцалов М. Г. [и др.]. Производство гидротехнических работ : учеб. для вузов. Часть 2. М. : Издательство МГОУ, 2010. 394 с.
7. Булатов Г. Я. Методические указания по туннельным работам / ЛПИ. Л., 1970. 58 с.
8. Родченко Г. А. Определение производительности строительных машин / ЛПИ. Л., 1975. 55 с.
9. Булатов Г. Я. К теории производительности строительных машин // Строительство. К 100-летию Инженерно-строительного факультета: Тр. СПбГТУ, №502. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2007. С. 129–138.
10. Галузин В. М. Технология строительных процессов. Разработка котлованов : Метод. указ. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2007. 79 с.
11. Телешев В. И., Ватин Н. И., Марчук А. Н., Комаринский М. В. Производство гидротехнических работ. Часть 1. М. : Изд-во АСВ, 2010. 432 с.
12. Теличенко В. И. и др. Технология строительных процессов. М. : Высш. шк., 2005. 392 с.
13. Ясинецкий В. Г., Ачкасов Г. П., Иванов Е. С. Производство гидромелиоративных работ. М. : Агропромиздат, 1987. 143 с.
14. Boulatov G. et autr. Contribution à l'exploitation des camions basculants (stabilité d'un camion) // Annales de l'institut polytechnique Gamal Abdel Nasser. République de Guinée, Conakry, 1972.
15. Boulatov G. et autr. Coupe des minerais à l'aide d'une pelle mécanique dans les conditions optimales // Annales de l'institut polytechnique Gamal Abdel Nasser. République de Guinée, Conakry, 1973.

**Георгий Яковлевич Булатов, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812) 297-59-49; эл. почта: bagira@cef.spbstu.ru*