

УДК 622.5; 622.58; 622.2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ПОНТОННОГО ЭКСКАВАТОРА ПРИ ЧЕРПАНИИ ИЗ-ПОД ВОДЫ

Кисляков В.Е., Никитин А.В., Гузеев А.А.

Сибирский федеральный университет

Целью настоящей работы является разработка и обоснование технологической схемы отработки обводненного месторождения. Разработку обводненных месторождений полезных ископаемых предлагается вести одним уступом с применением экскаватора, установленного на понтоне, или понтонным экскаватором. Приведены и обоснованы технологические параметры предложенной схемы разработки. Установлены зависимости изменения шага передвижки экскаватора от высоты уступа. Разработана методика расчета объема вынимаемой горной массы с одного места стояния. Разработана методика расчета межшаговых потерь в целиках, остающихся после работы экскаватора на понтоне, а также приведена методика по уменьшению объема потерь. Приведен пример расчета по указанным методикам. Представленные технологические схемы позволят вести отработку обводненных месторождений из-под воды, исключая процесс водоотлива или снижая его объемы при частичном затоплении карьерного поля.

Ключевые слова: понтонный экскаватор, экскаватор на понтоне, обводненные месторождения, подводный забой, межшаговый целик, технологические схемы экскаваторной разработки.

THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PONTON EXCAVATOR WORK DURING SCOOPING OUT OF THE WATER

Kislyakov V.E., Nikitin A.V., Guzeev A.A.

Siberian Federal University

The aim of this work is to develop and establish an optimal stoping method at the water-bearing deposit. The development of water-bearing deposits is proposed to mine in one slope using an excavator which placed on a pontoon or pontoon excavator. The technological parameters of the proposed stoping method are reported and explained. The dependence of advance increment of excavator from cutting depth is determined. The design procedure of volume excavated rock mass from one workplace is elaborated. The design procedure of losses into the blocks kept after work on a pontoon excavator is elaborated. And also a method to reduce the losses is presented. An example of calculation for the above-noted procedures is given. Submitted technological schemes will allowed to mine the water-bearing deposit out of the water, except dewatering process or reducing its volume in the partial sinking of career fields.

Keywords: pontoon excavator, excavator on pontoon, water-bearing deposit, submerged bottomhole, technological schemes of digging.

При разработке обводненных месторождений твердых полезных ископаемых горнодобывающие предприятия несут значительные затраты на: приобретение и поддержание оборудования для водоотлива; непосредственно водоотлив; возведение и эксплуатацию гидротехнических сооружений, нарушая большие площади земель, необходимые для размещения гидротехнических сооружений.

В целях сокращения затрат предлагается вести горные работы из-под воды, исключая процессы водоотлива и затапливая карьерное поле. Для отработки затопленного карьерного поля предлагаются технологические схемы разработки одним уступом экскаватором на понтоне [3].

Высота уступа при работе гидравлических экскаваторов определяется графическим методом с учетом траектории движения ковша [4, п. 50]. В отличие от гидравлических

экскаваторов, работающих на твердом основании, высота уступа гидравлического экскаватора, установленного на понтоне, должна быть меньше на величину колебания уровня воды в карьере.

Для определения оптимальной высоты уступа (верхнего подступа) и шага передвижки экскаватора, при которых достигается минимальное количество передвижек и максимальный объем выемки горных пород с одного места стояния, была принята возможная зона выемки экскаваторов согласно техническому паспорту оборудования. В качестве примера были взяты экскаваторы Liebherr P996 Aqua Digger, Liebherr R 982 LC, Aqua Digger Demag H185S и Liebherr P995 [1; 2; 5].

Оптимальная высота уступа и шаг передвижки, при которых достигается максимальная площадь выемки с одного места стояния, для вышеперечисленных экскаваторов указаны в таблице 1.

Таблица 1. Технологические параметры схемы отработки уступа (верхнего подступа)

Параметры	Условные обозначения	Модель экскаватора			
		Liebherr P996 Aqua Digger	Liebherr R 982 LC	Aqua Digger Demag H185S	Liebherr P995
Высота понтона, м	T	3,5	2,25	3,53	3,1
Осадка понтона, м	T_o	2,7	1,4	2,7	2,0
Максимальный диаметр валунов (негабаритов, крупных отдельностей) на затопленной площадке, м	d_{max}	0,3	0,35	0,33	0,6
Принятая высота подтопленной части уступа, м	H_n	4	4	4	4
Оптимальная высота верхнего подступа, м	H_y	9,5	6,7	7,7	8,8
Принятая высота подтопленной части уступа, м	H_n	19,4	7,5	20,7	8,6
Оптимальная высота уступа, м	H_y	22,9	12,7	24	13,7

Минимальная глубина в забое экскаватора:

$$l_{\min} = d_{\max} + 0,5, \text{ м}, \quad (1)$$

где d_{\max} – максимальный диаметр валунов (негабаритов) на затопленной площадке, м; 0,5 – минимальный зазор для безопасного передвижения экскаватора на понтоне.

Минимальная высота подтопленной части уступа:

$$H_n = T_o + l_{\min}, \text{ м.} \quad (2)$$

где T_o – глубина осадки понтона, м.

Рассмотрим более детально технологическую схему обработки уступа (подступа), показанную на рисунке 1.

Величина максимального шага передвижки экскаватора в зависимости от высоты уступа показана в таблице 2.

Таблица 2. Изменение максимального шага передвижки экскаватора в зависимости от высоты уступа

Высота уступа, м	Шаг передвижки экскаватора, м	Эмпирические коэффициенты
Liebherr P995		
$1 \leq H_y \leq 8$	$a_{\text{ш.э.}} = a \cdot H_y^b$	$a=8,29, b=0,37$
$8 < H_y < 13,7$	$a_{\text{ш.э.}} = c \cdot \ln(H_y) + d$	$c=-7,18, d=32,27$
$13,7 \leq H_y \leq 2$	$a_{\text{ш.э.}} = z \cdot e^{f \cdot H_y}$	$z=402,66, f=-0,26$
Liebherr P996 Aqua Digger		
$1 \leq H_y \leq 6$	$a_{\text{ш.э.}} = a \cdot H_y^b$	$a=8,39, b=0,5$
$6 < H_y \leq 16$	$a_{\text{ш.э.}} = c \cdot \ln(H_y) + d$	$c=6,19, d=8,72$
$16 < H_y < 22,9$	$a_{\text{ш.э.}} = k \cdot H_y^2 + l \cdot H_y + m$	$k=0,24, l=-10,34, m=128,29$
$22,9 \leq H_y \leq 39$	$a_{\text{ш.э.}} = z \cdot e^{f \cdot H_y}$	$z=2501,1, f=-0,22$
Liebherr R 982 LC		
$1 \leq H_y \leq 3$	$a_{\text{ш.э.}} = a \cdot H_y^b$	$a=6,68, b=0,46$
$3 < H_y \leq 5,5$	$a_{\text{ш.э.}} = c \cdot \ln(H_y) + d$	$c=3,09, d=7,58$
$5,5 < H_y \leq 9$	$a_{\text{ш.э.}} = k \cdot H_y^2 + l \cdot H_y + m$	$k=0,35, l=-0,57, m=33,74$
$9 < H_y \leq 12,7$	$a_{\text{ш.э.}} = 10$	
$12,7 < H_y \leq 22$	$a_{\text{ш.э.}} = z \cdot e^{f \cdot H_y}$	$z=1677,8, f=-0,39$
Aqua Digger Demag H185S		
$1 \leq H_y \leq 3$	$a_{\text{ш.э.}} = a \cdot H_y^b$	$a=8,47, b=0,4$
$3 < H_y \leq 15$	$a_{\text{ш.э.}} = c \cdot \ln(H_y) + d$	$c=6,53, d=5,53$
$15 < H_y \leq 20$	$a_{\text{ш.э.}} = k \cdot H_y^2 + l \cdot H_y + m$	$k=0,07, l=-3,14, m=53,6$
$20 < H_y \leq 24$	$a_{\text{ш.э.}} = 20,6$	
$24 < H_y \leq 42$	$a_{\text{ш.э.}} = z \cdot e^{f \cdot H_y}$	$z=1268,4, f=-0,17$

При работе экскаватора на максимальную глубину черпания имеют место межшаговые потери на нижнем подступе, в виде треугольника с вогнутыми сторонами (рис. 1, более подробно межшаговый целик показан на рис. 2, 3). На площадь поперечного сечения

межшагового целика влияет величина шага передвижки понтонного экскаватора и глубины черпания экскаватора.

Площадь поперечного сечения межшагового целика:

$$S_n = S_{\Delta} - S_1 - S_2, \text{ м}^2, \quad (3)$$

где S_{Δ} – площадь треугольника потерь, м^2 .

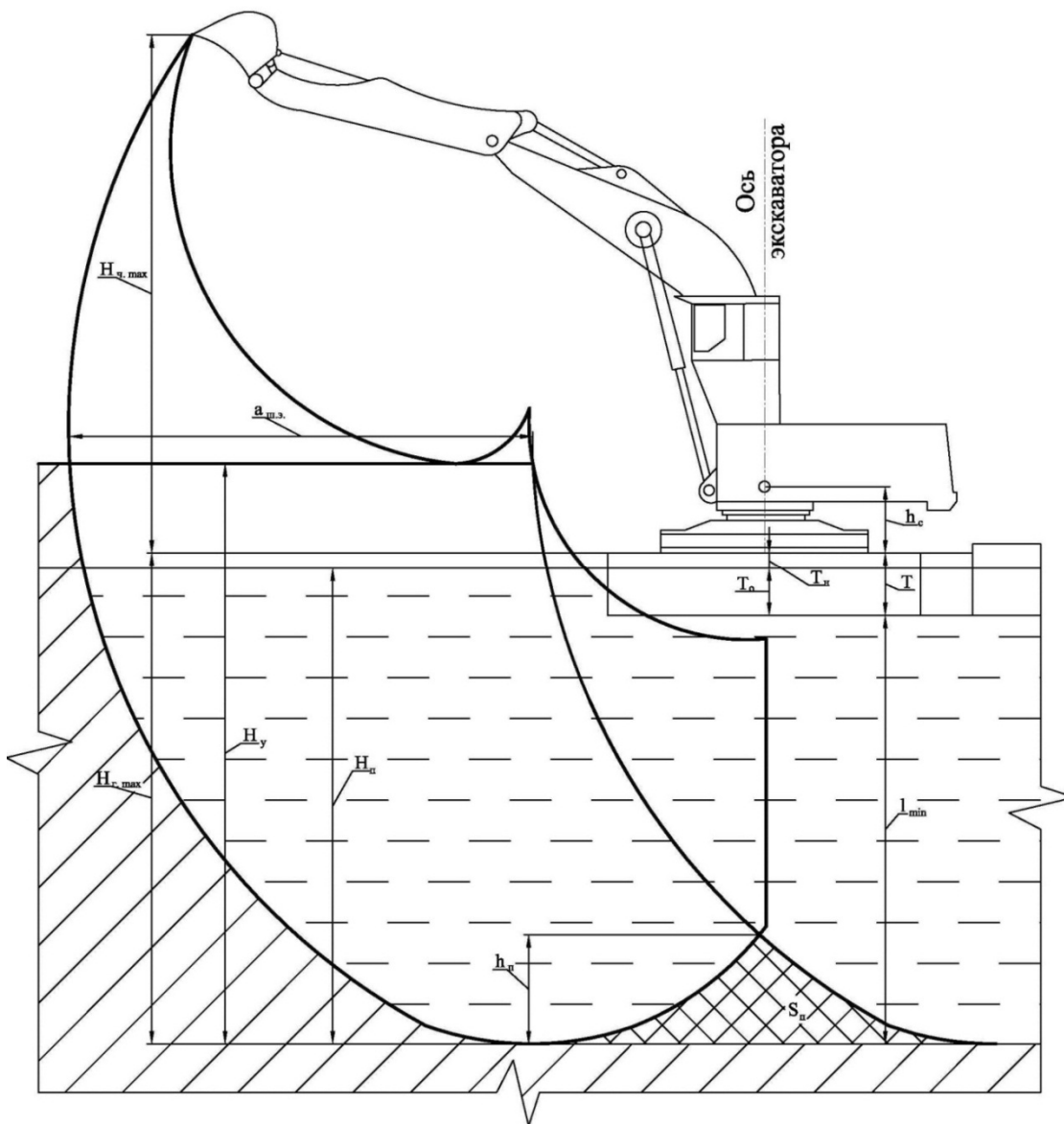


Рис. 1. Схема обработки верхнего подступа (на примере экскаватора Liebherr P996 Aqua

Digger): H_y – высота уступа, м; $H_{q,max}$ – максимальная высота черпания, м; $H_{c,max}$ – максимальная глубина черпания, м; H_n – высота подтопленной части уступа, м; T_n – высота надводной части понтона, м; T – высота понтона, м; h_n – высота межшагового целика, м; h_c – высота крепления стрелы экскаватора от понтона, м; $a_{ш.э.}$ – шаг передвижки экскаватора, м

$$S_{\Delta} = \frac{1}{2} \cdot a_{ш.э.} \cdot h_n, \text{ м}^2, \quad (4)$$

Высота межшагового целика (рис. 3):

$$h_n = p \cdot S_n^{\lambda}, \text{ м}, \quad (5)$$

где p, λ – эмпирические коэффициенты, зависящие от модели экскаватора (табл. 3).

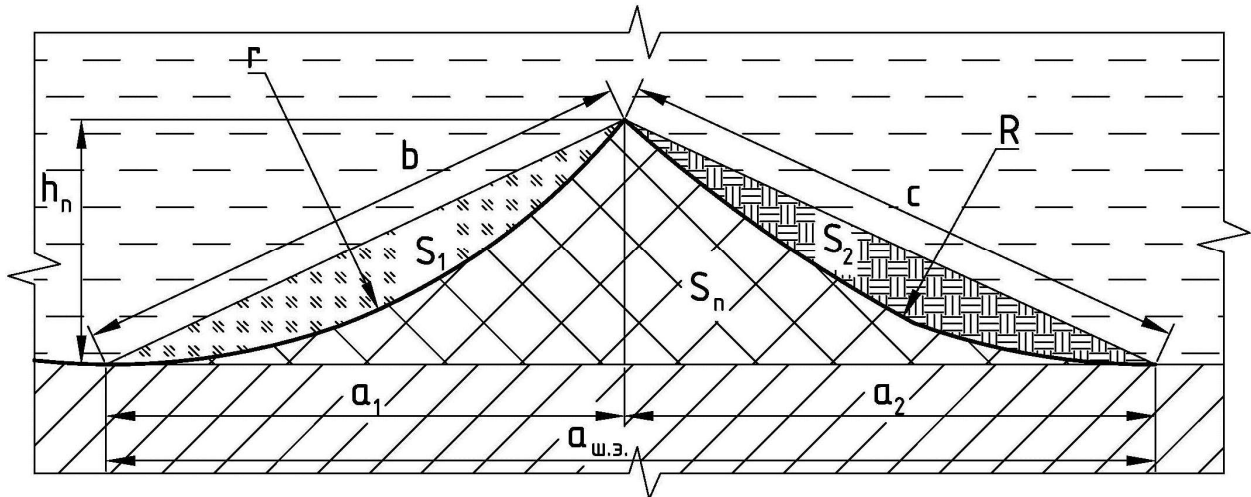


Рис. 2. Межшаговый целик: S_1 – площадь первого сегмента, м^2 ; S_2 – площадь второго сегмента, м^2 ; r, R – радиусы первого и второго сегментов, м; b, c – длина хорды первого и второго сегментов, м; a_1, a_2 – длина проекции хорд на горизонтальное основание, м

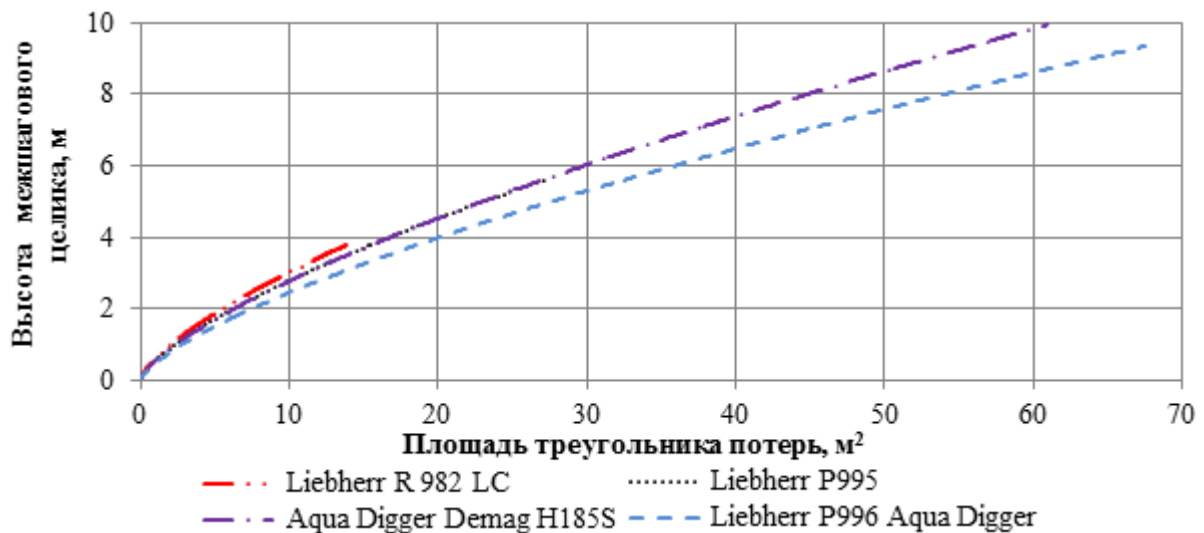


Рис. 3. Изменения высоты целика межшаговых потерь

Таблица 3. Эмпирические коэффициенты, зависящие от модели экскаватора

Экскаватор	Значение коэффициентов
------------	------------------------

	p	λ
Liebherr P995	0,5583	0,6992
Liebherr P996 Aqua Digger	0,491	0,6994
Liebherr R 982 LC	0,6126	0,6933
Aqua Digger Demag H185S	0,5486	0,7047

$$S_1 = \frac{r^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \gamma_1}{180} - \sin \gamma_1 \right), \text{ м}^2, \quad (6)$$

$$S_2 = \frac{R^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \gamma_2}{180} - \sin \gamma_2 \right), \text{ м}^2, \quad (7)$$

где γ_1, γ_2 – угол первого и второго секторов (образующих сегменты с радиусами r и R), град.

$$\gamma_1 = 2 \cdot \arcsin \frac{b}{2 \cdot r} = 2 \cdot \arcsin \frac{\sqrt{a_1^2 + h_n^2}}{2 \cdot r}, \text{ град}, \quad (8)$$

$$\gamma_2 = 2 \cdot \arcsin \frac{c}{2 \cdot R} = 2 \cdot \arcsin \frac{\sqrt{a_2^2 + h_n^2}}{2 \cdot R}, \text{ град}. \quad (9)$$

Для определения длины проекции хорды на горизонтальное основание необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} (x - a_{\text{ш.э.}})^2 + (y - R)^2 = R^2 \\ (x - r)^2 + (y - r)^2 = r^2 \end{cases}. \quad (10)$$

Преобразовав систему уравнений, получим:

$$x^2 - 2 \cdot x \cdot a_{\text{ш.э.}} + a_{\text{ш.э.}}^2 - R^2 - \left(\frac{(R^2 - a_{\text{ш.э.}}^2) + (2 \cdot r - 2 \cdot a_{\text{ш.э.}}) \cdot x}{2 \cdot r - 2 \cdot R} - r \right)^2 = 0. \quad (11)$$

Далее, подставив данные, решаем квадратичное уравнение, где меньший из получившихся x_1 и x_2 будет равен a_1 .

$$a_2 = a_{\text{ш.э.}} - a_1, \text{ м}. \quad (12)$$

Для исключения потерь высота уступа должна отвечать условию:

$$H_y \leq H_{ч.макс} + H_{г.макс} - h_n, \text{ м.} \quad (13)$$

Также площадь межшагового целика можно уменьшить за счёт уменьшения глубины черпания (рис. 4).

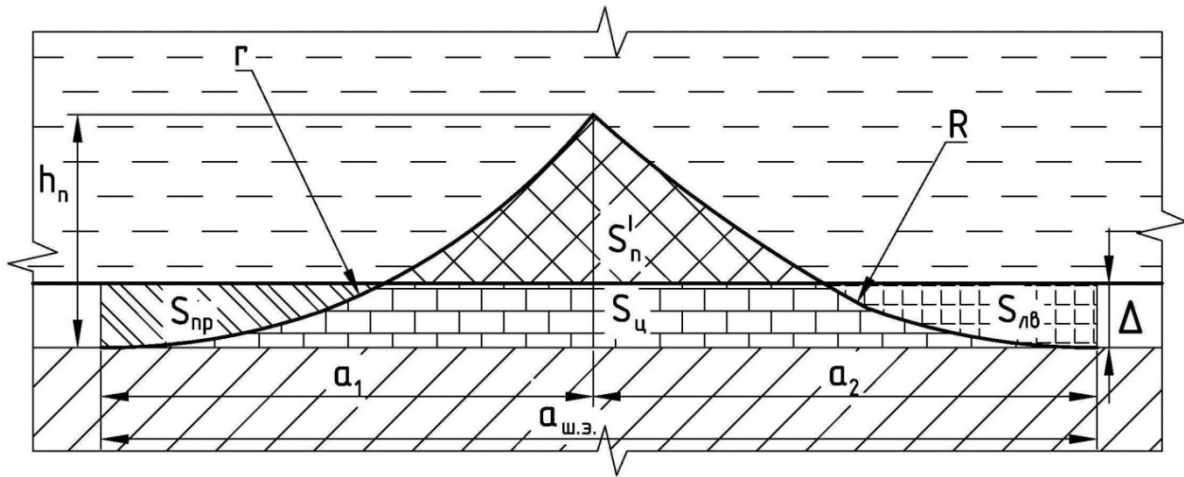


Рис. 4. Уменьшение межшагового целика: Δ – величина уменьшения глубины черпания, м; $S_{ц}$ – площадь сокращения потерь, м^2 ; $S_{нп}$, $S_{лв}$ – площади сегментов горного массива, м^2

При уменьшении глубины черпания площадь межшагового целика определится:

$$S'_н = S_n - S_{ц}, \text{ м}^2. \quad (14)$$

Общая площадь целика горной массы ниже принятого уровня черпания:

$$S_{ц} = S_г - S_{лв} - S_{нп}, \text{ м}^2, \quad (15)$$

где $S_г$ – общая площадь целика горной массы принятого уровня черпания, м^2 .

$$S_г = \Delta \cdot a_{ш.э.}, \text{ м}^2. \quad (16)$$

Площади сегментов горного массива:

$$S_{нп} = \frac{r^2 \cdot \left(\arccos\left(1 - \frac{\Delta}{r}\right) - \frac{1}{2} \cdot \sin\left(\arccos\left(1 - \frac{\Delta}{r}\right) \cdot 2\right) \right)}{2}, \text{ м}^2, \quad (17)$$

$$(18)$$

$$S_{\text{лв}} = \frac{R^2 \cdot \left(\arccos\left(1 - \frac{\Delta}{R}\right) - \frac{1}{2} \cdot \sin\left(\arccos\left(1 - \frac{\Delta}{R}\right) \cdot 2\right) \right)}{2}, \text{ м}^2.$$

Объем выемки горных пород с одного места стояния экскаватора при работе одним уступом:

$$V_{\text{з.м.}} = a_{\text{ш.э.}} \cdot H_y \cdot L, \text{ м}^3. \quad (19)$$

При уменьшении глубины черпания объем выемки горных пород с одного места стояния экскаватора:

$$V_{\text{з.м.}} = (a_{\text{ш.э.}} \cdot H_y - S_{\text{нр}} - S_{\text{лв}}) \cdot L, \text{ м}^3, \quad (20)$$

где L – длина кромки забоя в плане на расстоянии, равном половине шага передвижки, м (рис. 5).

$$L = \frac{\pi \cdot R_3 \cdot \alpha}{180^\circ}, \text{ м}, \quad (21)$$

где α – угол поворота экскаватора в заходке при ее отработке, град; R_3 – расстояние от оси экскаватора до середины отрабатываемой заходки.

$$R_3 = R_{\text{ч.макс}} - \frac{a_{\text{ш.э.}}}{2}, \text{ м}, \quad (22)$$

где $R_{\text{ч.макс}}$ – максимальный радиус черпания экскаватора, м.

Объем потерь:

$$V_n = S_n \cdot L, \text{ м}^3. \quad (23)$$

Максимальный шаг передвижки при оптимальной высоте уступов (табл. 1) составил: Liebherr P996 Aqua Digger $a_{\text{ш.э.}}=18$ м, Liebherr R 982 LC $a_{\text{ш.э.}}=10$ м, Aqua Digger Demag H185S $a_{\text{ш.э.}}=20,6$ м и Liebherr P995 $a_{\text{ш.э.}}=13,6$ м.

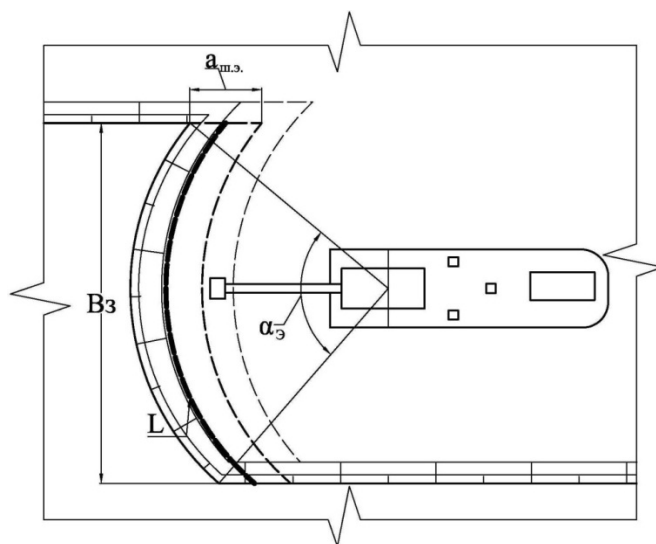


Рис. 5. Вид заходки экскаватора на понтоне в плане

Например, для экскаватора Liebherr P996 Aqua Digger при отработке месторождения одним уступом высотой 22,9 м и высоте подтопленной части 19,4 м шаг передвижки составит 18 м, отсюда площадь межшагового целика $24,5 \text{ м}^2$ и высота целика 4,6 м. Тем самым, чтобы исключить потери высота уступа, должно выполняться условие $H_y \leq 18,3 \text{ м}$. Также при максимальном радиусе черпания 27,5 м и угле поворота экскаватора 110 градусов $R_3=18,5 \text{ м}$, $L=35,5 \text{ м}$ и объем, вынимаемый гидравлическим экскаватором с одного места стояния, составит $14633,1 \text{ м}^3$, а потери $869,8 \text{ м}^3$. При исключении потерь объем, вынимаемый гидравлическим экскаватором с одного места стояния, составит не более $11693,7 \text{ м}^3$.

Таким образом, представленные технологические схемы позволяют вести отработку обводненных месторождений из-под воды, исключая процесс водоотлива или снижая его объемы при частичном затоплении карьерного поля.

Список литературы

1. Гидротехническое строительство // Официальный сайт компании Liebherr [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.liebherr.com/EM/ru-RU/region-\(rus\)/products_em.wfw/id-694-0/measure-metric](http://www.liebherr.com/EM/ru-RU/region-(rus)/products_em.wfw/id-694-0/measure-metric) (дата обращения: 17.04.2014).
2. Официальный сайт компании Nautilus Minerals Inc ("Nautilus") [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nautilusminerals.com/s/Home.asp> (дата обращения: 17.04.2014).
3. Кисляков В.Е., Гузеев А.А. Способ открытой разработки обводненных месторождений полезных ископаемых : патент 2469191 РФ. № 2011145752/03, заявл. 10.11.2011; опубл. 2012. Бюл. № 34.
4. ПБ 03-498-02. Единые правила безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

5. Backhoe Dredgers. Dredging Equipment. DEME [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.deme-group.com/backhoe-dredgers> (дата обращения: 19.02.2014).

Рецензенты:

Гилёв А.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Горные машины и комплексы», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» Институт горного дела, геологии и геотехнологий, г. Красноярск.

Анушенков А.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Подземная разработка месторождений», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» Институт горного дела, геологии и геотехнологий, г. Красноярск.