

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.004.4

И. Т. Мельников

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗВЕДЕНИЯ НАМЫВНЫХ ХВОСТОХРАНИЛИЩ РАВНИННОГО И НАГОРНОГО ТИПОВ

В современных условиях на каждого жителя планеты ежегодно приходится 45 т добываемого сырья, которое перерабатывается в продукты потребления с использованием 800 т свежей воды, 2,5 кВт мощности и отторжения 2 м² поверхности земли [1]. Только 2% добываемых твердых полезных ископаемых используются человечеством, остальные складываются в накопителях промышленных отходов. Для складирования отходов горно-обогатительного производства, обеспечения обогатительных фабрик оборотной технологической водой предназначены хвостохранилища, которые никогда не были статьёй дохода, а наоборот, требовали изъятия значительных площадей земель и являлись источниками загрязнения воздушного и водного бассейнов. Хвостохранилища занимают значительные площади: на Оленегорском горно-обогатительном комбинате (ГОКе) – 13,5 км², Ковдорском – 9,4 км², Костомукском – 43,2 км², Лебединском – 20,0 км², Михайловском – 9,6 км², Качканарском – 25 км². Около половины этих площадей занимают прудки-отстойники, в которых в общей сложности находится в обороте более 12 млрд м³ технической воды, так как запасы технологической воды на каждом ГОКе должны обеспечивать 10–15-суточные потребности обогатительных фабрик.

В отечественной и зарубежной практике наиболее широко распространены хвостохранилища намывного типа, требующие меньших капитальных и эксплуатационных затрат по сравнению с наливными. По мере наращивания хвостохранилищ поднимаются и прудки-отстойники, накапливая огромную потенциальную энергию и превращаясь в «бомбы замедленного действия». Прорыв вод из прудков-отстойников приводит к крупнейшим авариям на хвостохранилищах (1965 г. – Чили, рудник Эль-Кобре; 1972 г. – США, разрез Буффало-Крик; 1979 г. – Россия, Сорский молибденовый комбинат; 1999 г. – Россия, Качканарский ГОК), которые сопровождаются и человеческими жертвами, и значительными загрязнениями природной среды [2]. Основные причины катастрофического разрушения ограждающих дамб заключаются в недостаточном обосновании технологических параметров, проседании намывного массива из-за таяния криогенных конкреций, сейсмических колебаний, волнового воздействия со стороны верхнего бьефа, перелива воды через гребень дамб при необоснованной интенсивности возведения хвостохранилищ и других факторов.

В практике проектирования и эксплуатации хвостохранилищ возникает необходимость определения основных технологических параметров: удельных (на 1 м периметра хранилища) технологических и геометрических объемов как поярусных, так и суммарных, интенсивности возведения отвала (высоты намываемого яруса), коэффициента заполнения хвостохранилищ в зависимости от их конструктивных параметров и технологии намыва, рельефа местности, а также количества и свойств складываемого материала [3, 4]. Как правило, основные технологические параметры намывных хвостохранилищ принимаются постоянными и не учитывается динамичность работы горно-обогатительных комплексов и изменчивость конъюнктуры рынка на производимую продукцию. По мере заполнения хвостохранилищ равнинного типа периметр (длина) намывного фронта с каждым годом уменьшается, а для нагорного – возрастает. Количество складываемых хвостов может изменяться в зависимости от колебаний содержания полезных компонентов в исходной руде и объёмов её переработки, совершенствования обогатительного производства, требований рынка по качеству и количеству готовой продукции.

Площадь и форма земельного отвода под хвостохранилище, предельная высота намыва и проектная вместимость накопителя рассчитываются или задаются на первоначальной стадии проекта. Решение задачи по определению интенсивности возведения хвостохранилищ, длины фронта намыва и протяженности распределительных пульпопроводов является актуальной научно-производственной проблемой, так как позволяет прогнозировать на стадии проектирования и корректировать по ходу

заполнения основные технологические параметры накопителей промышленных стоков, обеспечивая их устойчивую работу в динамически изменяющейся системе.

Технология возведения намывных хвостохранилищ в климатических условиях России состоит из нескольких этапов. Первоначально возводится пионерная (насыпная) дамба из местных или привозных материалов (рис. 1). Затем наступает наливная стадия заполнения накопителя, когда пульпа подается на ложе хвостохранилища и происходит процесс накопления хвостов, из которых в дальнейшем возводятся дамбы обвалования и продолжается намывной процесс возведения хвостохранилищ. В летний период по всему периметру хвостохранилища возводится дамба обвалования на высоту, обеспечивающую годовой объем складирования хвостов, и на зимний период поднимается уровень воды в прудке-отстойнике, чтобы не допустить его промерзания и обеспечить бесперебойную работу системы оборотного водоснабжения.

Необходимо отметить, что у хвостохранилищ равнинного типа, в отличие от нагорного и овражно-пойменного, всегда неизбежны две очереди намывного периода: первая – когда часть отходов производства еще укладывается на материнское основание накопителей промышленных стоков (см. рис. 1, ярус 1 и 2), вторая – когда все хвосты размещаются на искусственное основание, то есть на уже ранее намытые отходы (ярусы 3, 4 и др.). Разделом, или границей, обеих очередей намыва, является пунктирная линия 6–14.

Примем за ось ординат вертикаль, а за ось абсцисс – горизонталь, проведенные через нижнюю бровку внешнего откоса пионерной дамбы (см. рис. 1). Обозначим через $M = \text{ctg } \alpha$, $m_0 = \text{ctg } \alpha_0$, $m_1 = \text{ctg } \alpha_1$, $m_2 = \text{ctg } \alpha_2$, $m_3 = \text{ctg } \alpha_3$, $m = m_4 = \text{ctg } \alpha_4$; соответственно коэффициент заложения наружного откоса намывной части хранилища, его основания (ложа), внешнего и внутреннего откосов насыпной дамбы, внешнего и внутреннего откоса дамбы обвалования и надводно-подводного пляжа хранилища; i – порядковый номер яруса; n – общее количество ярусов дамб обвалования в хранилище; h_0, b_0 – высота и ширина бермы пионерной дамбы, м; h_i, b_i – высота и ширина бермы дамбы обвалования i -го яруса, м; $\sum h_{i1}, \sum h_{i2}$ – высота 1-й и 2-й очереди намывной части отвала, м; B, L – ширина и длина основания (дна) хранилища прямоугольной формы или P – периметр земельного отвода любой формы, м; $\sum h_i, h_0 + \sum h_i$ – соответственно суммарная высота намывной части гидроотвала и общая высота, м.

Возьмем произвольный i -й ярус. Площадь в плоскости чертежа между его контурно-границными линиями разобьем на множество элементарно малых площадок с основанием Δx и текущей высотой y_k . Неограниченное увеличение количества элементарных площадок позволяет определить интегрированием удельный поярусный объем, который численно равен площади (см. рис. 1):

$$V_i = S_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{k=N} y_k \Delta x = \int_1^4 (y_6 - y_n) dx, \tag{1}$$

где y_6, y_n – текущие ординаты верхних и нижних контурных границ грунтового массива в i -ом ярусе; N – число сегментов технологических объёмов намывных хвостохранилищ (насыпной, наливной, намывной) 1 и 2 очередей.

Особо следует отметить, что на стадии проектирования определяется устойчивая высота хвостохранилища $H_{уст}$ с учетом физико-механических свойств хвостов в теле ограждающих дамб и пород тела основания, положения депрессионной кривой, гидростати-

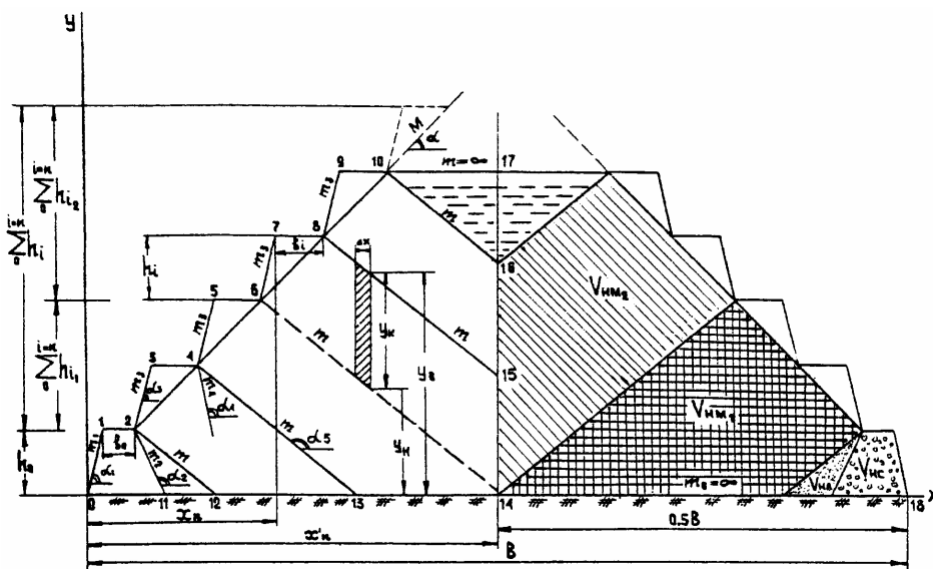


Рис. 1. Расчетная схема технологических параметров намывных хвостохранилищ равнинного типа

ческого и гидродинамического давления фильтрационного потока и должно выполняться условие $h_o + \sum h_i \leq H_{ycm}$. Основные технологические показатели намывных хвостохранилищ равнинного типа определяются формулами, приведенными ниже.

После интегрирования выражения (1) с учетом граничных пределов и необходимых алгебраических преобразований искомый удельный поярусный технологический объем отходов, который можно уложить на надводно-подводный пляж любого возводимого i -го яруса хранилища, можно записать в окончательном виде:

$$V_i = 0,5(a - d + Ae) \left(\sum_{i=0}^{i=n} h_i - \sum_{i=0}^{i=n-1} h_i \right)^2 + \left\{ f + (1 - A)g + b[1 - c(1 - A)] \sum_{i=0}^{i=n-1} h_i \right\} \cdot \left(\sum_{i=0}^{i=n} h_i - \sum_{i=0}^{i=n-1} h_i \right). \quad (2)$$

Предельную или граничную высоту первой очереди намывного периода и критический порядковый номер яруса, который является границей раздела первой и второй очередей намывного периода эксплуатации хвостохранилища с постоянной высотой яруса $h_i = \text{const}$, следует определять по формулам:

$$\sum_0^{i=n} h_{i,sp} = [0,5B - (m + m_1)h_o - b_o](m + m)^{-1}; \quad n_{sp} = [0,5B - (m + m_1)h_o - b_o] \cdot [(m + M)h_i]^{-1}. \quad (3)$$

Если суммарная высота намывной части хранилища равна или меньше предельно-граничной высоты первой очереди намыва, т.е. при $\sum h_i \leq \sum h_{i,sp}$, то $A = 1$; если $\sum h_i > \sum h_{i,sp}$, то $A = 0$.

Зная годовую производственную мощность эксплуатируемого объекта по отходам (массовую или объемную G, V), их плотность ν и пористость Π , а также длину разводящего замкнутого пульпопровода (периметр намывного фронта любого возводимого i -го яруса хранилища P_i), можно найти массу или объем золы, хвостов, породы или шлаков, удаляемых с объекта и укладываемых ежегодно на одном метре периметра хранилища по зависимости:

$$G_o = GP_i^{-1} \text{ или } V_o = G \left\{ \nu(1 - \Pi)2 \left[B + L - 4 \left(m_1 h_o + b_o + M \sum_0^{i=n-1} h_i \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

Длина фронта при намыве каждого яруса для горизонтального хвостохранилища определяется по формуле:

$$P_i = 2 \left[B + L - 4 \left(m_1 h_o + b_o + M \sum_0^{i=n-1} h_i \right) \right]. \quad (5)$$

Так как высота намываемого яруса определяется из расчета размещения заданного объема грунта в хвостохранилище за определенный период времени, то после совместного решения уравнений (2) и (4) получим аналитическое выражение для вычисления годовой интенсивности возведения накопителя:

$$h_i = \left(\sum_0^{i=n} h_i - \sum_0^{i=n-1} h_i \right) = \left\{ \left[f + (1 - A)g + b[1 - c(1 - A)] \sum_0^{i=n-1} h_i \right]^2 + (a - d + Ae)G \left[\nu(1 - \Pi) \left(K - 4M \sum_0^{i=n-1} h_i \right) \right]^{-1} \right\}^{1/2} - \left\{ f + ((1 - A)g + b[1 - c(1 - A)] \sum_0^{i=n-1} h_i) \right\} \cdot (a - d + Ae)^{-1}, \quad (6)$$

где $K = B + L - 4(m_1 h_o + b_o)$; a, b, c, d, e, f, g – постоянные параметры, учитывающие технологию возведения и конструктивные параметры хвостохранилищ, определяются по формулам; C, E, F – постоянные коэффициенты, равные 0 или 1; A – постоянный коэффициент, равный $\pm 1, 0$.

$$a = (M - m_3); b = (m + M); c = (m + M)m^{-1}; d = M(m + M)m^{-1};$$

$$e = (m + M)^2 m^{-1}; f = (m + M)h_0; g = (m + M)m^{-1} [0,5B - (m + m_1)h_0 - b_0]. \quad (7)$$

Обобщенная формула суммарного удельного технологического V_T объема (частей) хвостохранилищ равнинного типа имеет вид:

$$V_m = V_{nc} + V_{nl} + V_{nm1} + V_{nm2} = C [0,5(m_1 + m_2)h_0^2 + b_0 h_0] + 0,5E(m - m_2)h_0^2 +$$

$$+ A(m + M) \left(h_0 + 0,5 \sum_0^{i=n_{kp}} h_i \right) \sum_0^{i=n_{kp}} h_i + FM \left(h_0 + 0,5 \sum_0^{i=n} h_i \right) \sum_0^{i=n} h_i + 0,5(M - m_3) \times$$

$$\times \left[A \sum_0^{i=n_{kp}} (h_i)^2 + F \sum_0^{i=n} (h_i)^2 \right] + F \left\{ m^{-1} \left[m \left(h_0 + \sum_0^{i=n} h_i \right) - 0,5 \left(0,5B - m_1 h_0 - b_0 - M \sum_0^{i=n} h_i \right) \right] \times \right.$$

$$\left. \times \left(0,5B - m_1 h_0 - b_0 - M \sum_0^{i=n} h_i \right) - 0,5 m h_0^2 \right\}. \quad (8)$$

Обобщенная формула удельного геометрического V_z или суммарного объема насыпной V_{nc} , наливной V_{nl} и намывной V_{nm} частей хранилищ представлена в следующем виде:

$$V_z = (V_{nc} + V_{nl} + V_{nm})_{m=\infty} = \left(D h_0 + \sum_0^{i=n} h_i \right) [0,5B - (m_1 h_0 + b_0)] +$$

$$+ C [0,5(m_1 + m_2)h_0^2 + b_0 h_0] - 0,5 \left[D m_2 h_0^2 + \left(\sum_0^{i=n} h_i \right)^2 - (M - m_3) \sum_0^{i=n} (h_i)^2 \right], \quad (9)$$

где D – управляющий постоянный множитель, равный 1 или 0.

Расчетная схема для определения основных технологических параметров намывных хвостохранилищ нагорного типа представлена на **рис. 2**.

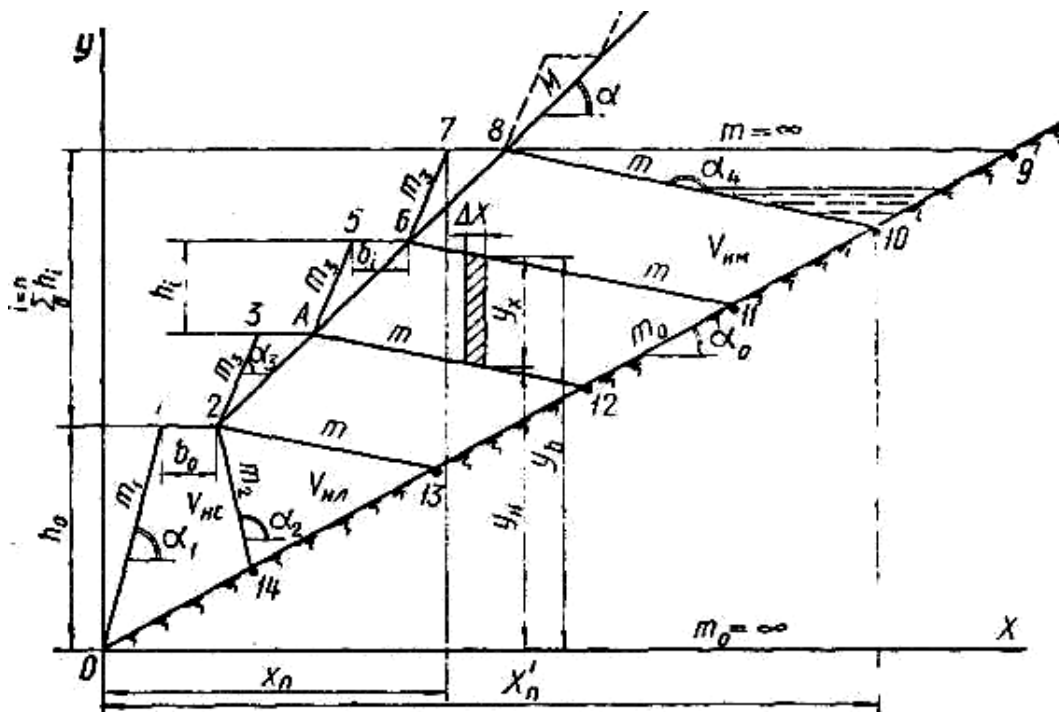


Рис. 2. Расчетная схема технологических параметров намывных хвостохранилищ нагорного типа

Основные технологические показатели намывных хвостохранилищ нагорного типа определяются по зависимостям:

$$V_i = \frac{1}{2} \left[M - m_3 + \frac{(m + M)(m_0 - M)}{m + m_0} \right] \left(\sum_{i=0}^{i=n} h_i - \sum_{i=0}^{i=n-1} h_i \right)^2 + \frac{m + M}{m + m_0} \left[(m_0 - m_1)h_0 - b_0 + (m_0 - M) \sum_{i=0}^{i=n-1} h_i \right] \left(\sum_{i=0}^{i=n} h_i - \sum_{i=0}^{i=n-1} h_i \right). \quad (10)$$

$$h_i = \left(\sum_{i=0}^{i=n} h_i - \sum_{i=0}^{i=n-1} h_i \right) = b^{-1} \left[\sqrt{\left(c + a \sum_{i=0}^{i=n-1} h_i \right)^2 + 2bV_0} - \left(c + a \sum_{i=0}^{i=n-1} h_i \right) \right]. \quad (11)$$

$$V_T = V_{HC} + V_{HL} + V_{HM} = (m_0 + m_2)^{-1} \left\{ A(m_0 - m_1) \left[0,5(m_1 + m_2)h_0^2 + b_0h_0 \right] - 0,5Ab_0^2 + 0,5(m - m_2)(m + m_0)^{-1} \left[(m_0 - m_1)h_0 - b_0 \right]^2 \right\} + (m + M)(m + m_0)^{-1} \left[(m_0 - m_1)h_0 - b_0 + 0,5(m_0 - M) \sum_{i=0}^{i=n} h_i \right] + 0,5(M - m_3) \sum_{i=0}^{i=n} (h_i)^2. \quad (12)$$

Длина фронта намыва каждого яруса хвостохранилища нагорного типа определяется по зависимости:

$$P_i = L - 2 \left(M \cdot \sum_{i=0}^{i=n-1} h_i + b_0n \right) + 2m_0(1 + m)^{-1} \left[(m + m_1)h_0 + b_0 + (m + M) \sum_{i=0}^{i=n-1} h_i \right]. \quad (13)$$

Коэффициент заполнения хвостохранилищ определяется как отношение суммы удельных технологических объемов наливной и намывной частей к сумме их удельных геометрических объемов и характеризует степень заполнения внутренней его чаши твердыми отходами, ибо гидравлическим способом нельзя заполнить отвал по всей его площади до отметки гребня последней ограждающей дамбы обвалования из-за наличия водоема для обеспечения осаждения мельчайших частиц и осветления поступающей в него пульпы и создания возможности подледного намыва в зимний или морозный период.

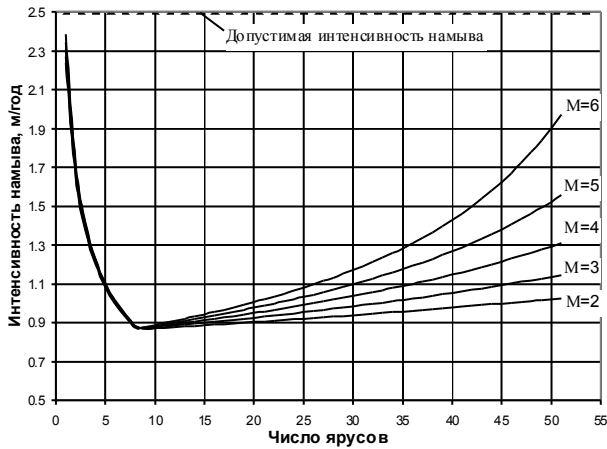
$$K = \frac{(V_{HL} + V_{HM})_m}{(V_{HL} + V_{HM})_{m=\infty}}. \quad (14)$$

Пусть требуется рассчитать для II отсека хвостохранилища ССГОКа годовые высоты ярусов и общую его высоту, а также удельный ярусный и суммарные технологические и геометрические объемы хранилища и его коэффициент заполнения отходами по следующим производственным, конструктивным, физико-механическим и технологическим данным: $G=12,4$ млн т отходов в год; $\Pi=0,46$; $\gamma=3,2$ т/м³; $h_0=4$ м; $b_0=8$ м; $M=5$; $m_1=2,5$; $m_2=3$; $m_3=2$; $m_4=2$; $m=57,3$; $m_0=\infty$; $n=50$; $B=1470$ м; $L=3218$ м. Для равнинных хвостохранилищ были выполнены расчеты основных технологических параметров при изменении коэффициента заложения внешнего M от 2 до 6, а для нагорных изменяли угол наклона основания к горизонту от 1° до 9°. Результаты расчетов приведены на **рис. 3**.

Анализ полученных результатов для равнинных намывных хвостохранилищ показывает, что в период первой очереди намыва интенсивность намыва снижается от 2,4 до 0,75 м и по мере наращивания начинает возрастать для второй очереди намыва до 1,6 м. Выполаживание внешних откосов ограждающих дамб приводит к увеличению интенсивности намыва.

Для нагорных же хвостохранилищ интенсивность намыва очень высока и растет с увеличением наклона площадки к горизонту. При допустимой интенсивности намыва (ДИН) не более 2,5 м/год за первые пять лет эксплуатации высота яруса может составлять 4–17 м при изменении α_0 от 1° до 9°, что предопределяет необходимость увеличения принятой в проекте длины L или высоты h_0 пионерной дамбы. По мере дальнейшей эксплуатации интенсивность намыва плавно снижается до 0,5 м. Принятое в проекте постоянное значение высоты яруса, равное 1 м, не подтвердилось практикой эксплуатации II отсека хвостохранилища ССГОКа.

Равнинные



Нагорные

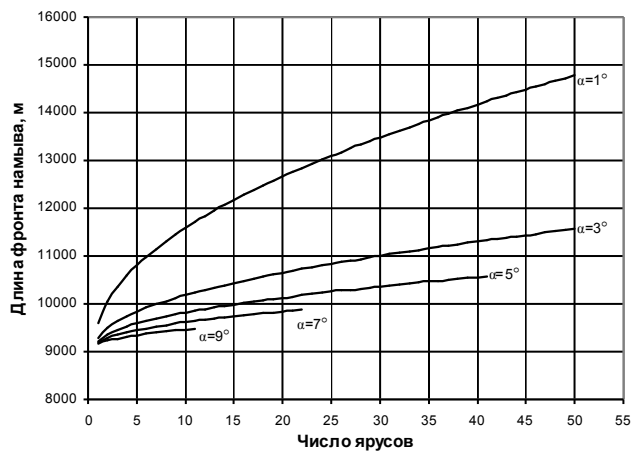
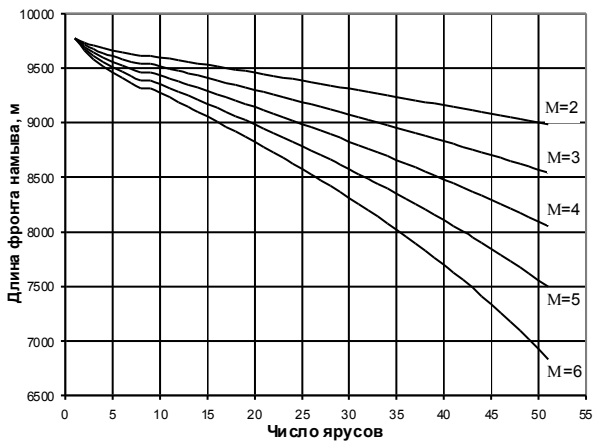
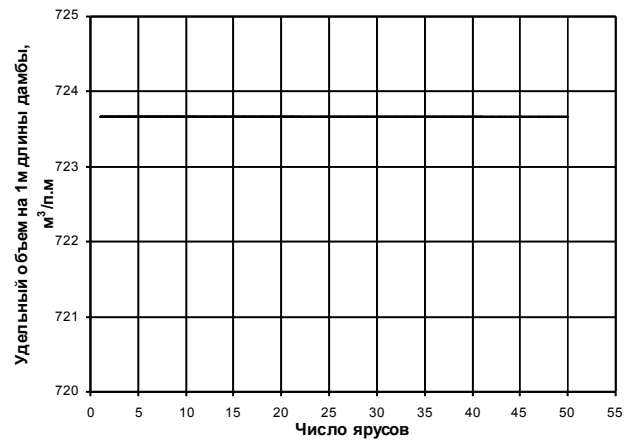
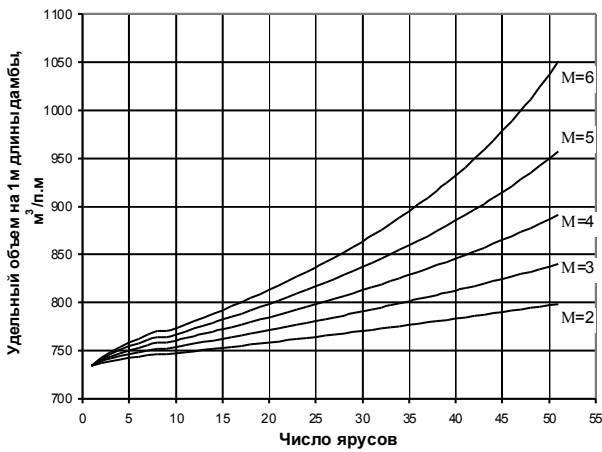
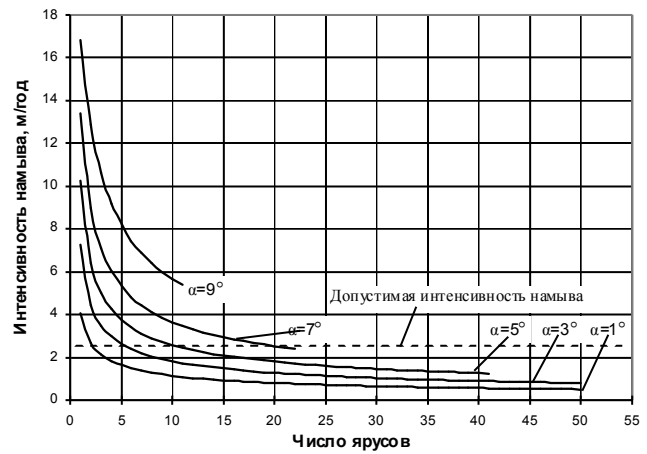


Рис. 3. Зависимости годовой высоты яруса или интенсивности намыва h_i , удельного поярусного годового технологического объема хвостов V_i и длины фронта намыва P_i от порядкового номера возводимого яруса или года эксплуатации хвостохранилищ при принятой условно устойчивой высоте $H_{уст.} = 100$ м

Принятая в проекте постоянная интенсивность намыва 1 м может привести к нарушению устойчивой эксплуатации хвостохранилищ или аварийной ситуации – прорыву ограждающих дамб. Удельные годовые объёмы хвостов для равнинных хвостохранилищ возрастают по мере эксплуатации и увеличения коэффициента заложения внешнего откоса M , а для нагорных остаются постоянными. Длина фронта намыва для рассматриваемого примера у равнинного хвостохранилища уменьшается, а нагорного типа возрастает. Поэтому при проектировании нагорных хвостохранилищ следует предусматривать ежегодное увеличение длины разводящих пульпопроводов. На основе математической модели технологии возведения намывных хвостохранилищ различных типов разработана программа, которая позволяет оперативно прогнозировать основные технологические параметры хвостохранилищ и корректировать проектные решения с учетом изменения ежегодных объемов складирования хвостов и технологии намыва, зависящая от количества и консистенции подаваемой пульпы, определяющих величину уклона надводного пляжа. Программный продукт может быть использован проектировщиками, эксплуатационниками и при подготовке инженеров-гидротехников.

Библиографический список

1. Юсфин Ю.С., Карабасов Ю.С., Карпов Ю.А. и др. Ресурсосбережение и экология в металлургии // Научные школы. МИСиС – 75 лет. М.: МИСиС, 1997. С. 272–283.
2. Антоненко Л.К., Зотеев В.Г., Морозов М.Г. Наземные хвостохранилища каскадного типа как реальные источники техногенных катастроф. Причины и следствия Качканарской аварии // Горный журнал. 2000. № 10. С. 49–52.
3. Трубецкой К.Н., Уманец В.Н., Никитин М.Б. Классификация техногенных месторождений, основные категории и понятия // Горный журнал. 1989. № 12. С. 6–9.
4. Евдокимов П.Д., Сазонов Г.Т. Проектирование и эксплуатация хвостовых хозяйств обогатительных фабрик. М.: Недра, 1978. 439 с.

УДК 622.2

Н. А. Ивашов

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ВСКРЫТИЯ ЗАПАСОВ ЗА ПРЕДЕЛЬНЫМ КОНТУРОМ КАРЬЕРОВ

В результате освоения крутопадающих месторождений открытым способом остаются запасы, расположенные за предельным контуром, доработка которых наиболее экономична подземным способом. Анализ практики отработки запасов, расположенных за пределами контуров карьеров, показывает, что наибольшее число рудников, осуществляющих комбинированную отработку запасов, приходится на предприятия по разработке руд цветных металлов и алмазов – более 60%. При этом 60–65% рудников осуществляют отработку запасов, находящихся ниже отметки дна карьера, 15–18% – в бортах карьеров и около 25% – удаленных от карьера отдельно расположенных залежей или участков месторождений. Одним из наиболее важных вопросов при комбинированной разработке месторождений является вскрытие запасов за контуром карьера.

Открытый и подземный способы разработки запасов месторождений комбинированной технологией предполагает создание единой системы вскрытия и подготовки, увязанных во времени и пространстве. При этом предусматривается размещение основных вскрывающих выработок с уче-

том развития горных работ, что позволяет существенно снизить капитальные и эксплуатационные расходы предприятий. Карьерные транспортные системы и сам карьер должны рассматриваться как вскрывающие выработки. Вскрывающие подземные выработки могут быть использованы не только для освоения запасов подземных горизонтов, но и для вскрытия глубоких горизонтов карьера.

Отказ от двух самостоятельных систем вскрытия карьерных и внекарьерных запасов в пользу применения общего варианта с комплексной увязкой технологий открытых и подземных работ и единым планом горных работ по освоению запасов месторождений расширяет область эффективного применения комбинированной технологии и позволяет избежать негативных последствий переходного периода при рассмотрении их в отдельных проектах.

Однако в настоящее время не разработаны способы вскрытия за предельным контуром карьера для условий комбинированной отработки месторождений, увязывающие системы вскрытия на всех этапах освоения месторождения, не определены области эффективного при-