

УДК [622.648.22:622.693.4].001.57

**Семененко Е.В.**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**Лапшин Е.С.**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**Киричко С.Н.**, аспирант  
(ИГТМ НАН Украины)

**ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СКЛАДИРОВАНИЯ  
ПАСТООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ В  
ЕСТЕСТВЕННЫХ ХРАНИЛИЩАХ ОТХОДОВ**

**Семененко Є.В.**, д-р техн. наук, ст. наук. співр.,  
**Лапшин Є.С.**, д-р техн. наук, ст. наук. співр.,  
**Киричко С.М.**, аспірант  
(ІГТМ НАН України)

**ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СКЛАДУВАННЯ  
ПАСТОПОДІБНИХ ВІДХОДІВ ЗБАГАЧЕННЯ ПРИ  
РОЗОСЕРЕДЖЕНИЙ ПОДАЧІ ПУЛЬПИ**

**Semenenko E.V.**, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher,  
**Lapshin E.S.**, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher,  
**Kirichko S.N.**, Doctoral Student  
(IGTM NAS of Ukraine)

**SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF STOCKING OF PASTE-  
LIKE CLEANING REJECTS INTO NATURAL WASTE STORAGE**

**Аннотация.** Предмет исследований – течение пастообразной пульпы по склону хранилища отходов. Цель работы – определить расстояние, на которое происходит перемещение фронта пульпы по склону хранилища, и массу складировуемых отходов. Растекание пастообразной пульпы по склону хранилища отходов моделировалось ползущим течением среды Бингама-Шведова. Дифференциальное уравнение, которое описывает изменение высоты слоя, решалось численным методом Рунге-Кутта-Фелберга 4-5 порядка. Впервые определено соотношение между числом Бингама и геометрическим комплексом (учитывает длину, угол наклона склона хранилища и начальную высоту слоя пульпы), при котором обеспечивается перемещение фронта пульпы на заданное расстояние. Полученные результаты планируется использовать при разработке перспективных технологий транспортирования и складирования отходов обогащения в виде пасты.

**Ключевые слова:** отходы, паста, рассредоточенная подача, течение, склон хранилища, масса отходов

**Введение.** Капитальные вложения на строительство современного крупного хранилища для отходов обогащения полезных ископаемых достигают от 5 до 35 % сметной стоимости горно-обогатительного комбината, а эксплуатационные затраты составляют до 30 % себестоимости концентрата [1].

Дефицит земли под новые хранилища и повышения требований к экологической безопасности вызывают необходимость в поиске новых технологий складирования отходов.

В мире наметилась тенденция в повышении концентрации отходов до состояния пасты, что позволяет комплексно решить большую часть технологических, экологических, и, в конечном счете, экономических проблем для технологий обогащения минерального сырья. Это подтверждается положительными результатами внедрения складирования пастообразных отходов обогащения (ПОО) на горных предприятиях Канады, России, США, ЮАР и др.

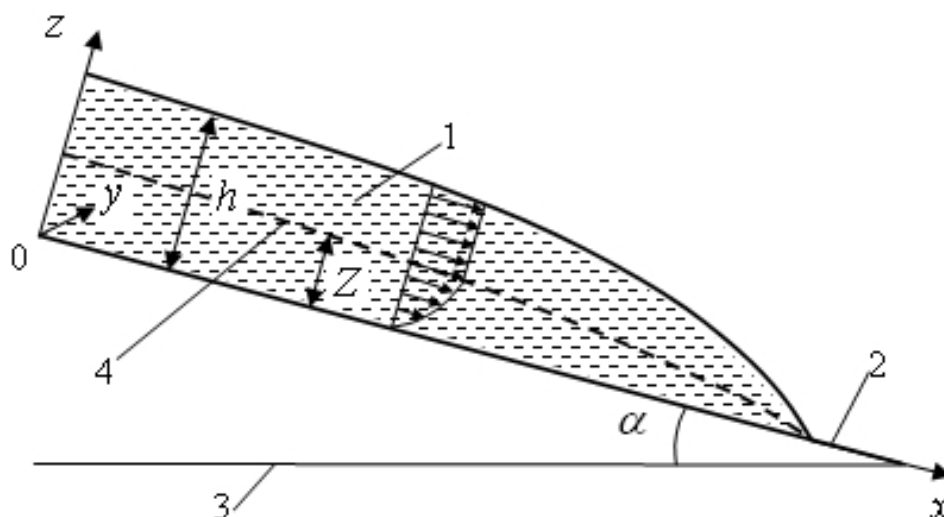
С позиции геоморфологии [2] выделяют следующие типы и хранилищ: овражно-балочный (с односторонним обвалованием); равнинный (с всесторонним обвалованием); косогорный (с трехсторонним обвалованием); котлованный (намывной массив формируется в выработанном пространстве карьеров или в естественных впадинах). Геоморфологическим типом хранилищ определяются затраты на их строительство. Применяют два вида подачи пульпы в хранилище: рассредоточенный (через отдельные выпуски или щелевой выпуск) и сосредоточенный (через торец трубы). В данной статье рассматривается первый вид подачи, а в последующей – второй.

При складировании ПОО необходимо учитывать, что они текут по склону только тогда, когда касательное напряжение достигает некоторой определенной величины, которую называют пределом текучести (ПТ).

Традиционные методы [2–5] расчета хранилищ отходов мокрого обогащения не учитывают возможность прекращения течения ПОО, обусловленного наличием ПТ.

**Цель работы** – определить расстояние, на которое произойдет перемещение фронта пульпы по склону хранилища, и массу складированных отходов.

Участок склона хранилища отходов аппроксимируем плоскостью (рис. 1).



1 – ПОО; 2 – плоскость; 3 – горизонт; 4 – поверхность скольжения

Рисунок 1 – Расчетная схема безнапорного течения пастообразных отходов обогащения по склону хранилища

Слой ПОО 1 стекает по плоскости 2, которая наклонена к горизонту 3 под углом  $\alpha$ . Будем считать, что пульпа – среда Бингама-Шведова и реализуется режим с поверхностью скольжения 4. Введем декартову систему координат  $xuz$ . Ось  $x$  направим по линии ската, ось  $y$  – перпендикулярно плоскости рисунка, а ось  $z$  – к свободной поверхности пульпы. Примем, что длина потока ПОО в направлении оси  $y$  настолько велика, что краевыми эффектами можно пренебречь, т. е. изменениями толщины потока по этой координате пренебрегаем.

Принятые допущения позволяют уравнения движения ПОО и неразрывности записать в следующем виде [6, 7]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \alpha + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g \sin \alpha + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где  $u$  и  $w$  – скорости соответственно вдоль осей  $x$  и  $z$ ;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\tau_{xx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}$  и  $\tau_{zz}$  – касательные напряжения;  $t$  – время. Индексы при  $\tau$  обозначают оси координат.

Напряжения для среды Бингама-Шведова определялись по формулам [6, 7]:

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \left( \eta + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \right) \dot{\gamma}_{ij} & \tau \geq \tau_0, \\ 0 & \tau < \tau_0, \end{cases} \quad \dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i},$$

$$\tau = \sqrt{0,5 \tau_{jk} \tau_{jk}}, \quad \dot{\gamma} = \sqrt{4 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2},$$

где  $\tau_0$  – предел текучести;  $\eta$  – вязкость ПОО;  $\dot{\gamma}_{ij}$  – скорости изменения тензора деформации;  $\tau$  и  $\dot{\gamma}$  – вторые инварианты  $\tau_{ij}$  и  $\dot{\gamma}_{ij}$ .

Граничные условия на дне потока ( $z = 0$ ), соответствуют условию прилипания

$$u(z = 0) = 0, \quad w(z = 0) = 0.$$

А граничные условия на свободной поверхности ( $z = h$ )

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} = w, \quad \tau_{xz} = \frac{\partial h}{\partial x} (\tau_{xx} - p), \quad \tau_{zz} - p = \frac{\partial h}{\partial x} \tau_{zx}.$$

Введем следующие безразмерные переменные:

$$\tilde{x} = \frac{x}{L}, \quad \tilde{z} = \frac{z}{H}, \quad \tilde{u} = \frac{u}{U}, \quad \tilde{h} = \frac{h}{H}, \quad \tilde{w} = \frac{wL}{UH}, \quad \tilde{t} = \frac{tU}{L}, \quad \tilde{p} = \frac{p}{\rho g H \cos \alpha}.$$

где  $H$  – характерная высота слоя пульпы;  $L$  – характерная длина слоя пульпы вдоль координаты  $x$ ;  $U$  – характеристическая скорость.

После их подстановки и незначительных преобразований уравнения (1) – (3) и граничные условия представим в таком виде [6, 7]:

$$\varepsilon^2 Re \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{w} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{z}} \right) = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} + S + \varepsilon^2 \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial \tilde{z}}, \quad (4)$$

$$\varepsilon^4 Re \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{w} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{z}} \right) = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{z}} + 1 + \varepsilon^2 \left( \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial \tilde{z}} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{z}} = 0, \quad (6)$$

$$\tau_{xx} = 2 \left( 1 + \frac{B}{E} \right) \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}}, \quad \tau_{zz} = 2 \left( 1 + \frac{B}{E} \right) \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{z}}, \quad \tau_{xz} = 2 \left( 1 + \frac{B}{E} \right) \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{z}} + \varepsilon^2 \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{x}} \right)$$

$$\varepsilon = \frac{H}{L}, \quad S = \frac{L}{H} \operatorname{tg} \alpha, \quad Re = \frac{U^2}{gH \cos \alpha} \left( \frac{H}{L} \right)^{-2}, \quad U = \frac{\rho g H^3}{\eta L} \cos \alpha,$$

$$B = \frac{\tau_0 L}{\rho g H^2 \cos \alpha}, \quad E = \sqrt{\left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{z}} + \varepsilon^2 \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{x}} \right)^2 + 4\varepsilon^2 \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} \right)^2},$$

где  $\varepsilon$  – геометрическая характеристика безнапорного потока;  $Re$  – число Рейнольдса;  $S$  – геометрический комплекс;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $B$  – число Бингама.

Из системы (4) – (6) при  $\varepsilon \rightarrow 0$  получено уравнение [6, 7], описывающее изменение толщины  $\tilde{h}$  потока

$$\frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{t}} + \frac{1}{6} \frac{\partial}{\partial x} \left[ Z^2 (3\tilde{h} - Z) \left( S - \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} \right) \right] = 0, \quad (7)$$

$$Z = \tilde{h} - \frac{B}{\left| S - \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} \right|},$$

где  $Z$  – координата поверхности скольжения (см. рис. 1).

Применительно к установившемуся движению  $\partial \tilde{h} / \partial \tilde{t} = 0$  уравнение (7) имеет вид

$$\frac{1}{6} \frac{\partial}{\partial x} \left[ Z^2 (3\tilde{h} - Z) \left( S - \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} \right) \right] = 0. \quad (8)$$

В качестве характерных размеров  $H$  и  $L$  примем начальную высоту подачи пульпы и заданную длину растекания (длина склона хранилища). Из (1)–(8) следует: течение пульпы зависит от реологических ( $\tau_0, \eta, \rho$ ) и геометрических параметров ( $H, \alpha$ ), которые характеризуются числом Бингама  $B$  и комплексом  $S$ . Только при определенном соотношении между ними достигается заданная длина растекания. Рациональные величины  $B$  и  $S$  определялись следующим образом. Задавался набор значений чисел Бингама  $B_r$  ( $r = 1, 2, \dots, n$ ). Для каждого из них варьировался геометрический комплекс  $S_{r,s}$ . Здесь первый индекс указывает на то, что вычисления выполнены для  $B_r$ , а второй – на  $s$ -ое значение  $S$ . Уравнение (8) решалось численно методом Рунге-Кутты-Фелберга 4-5 порядка и определялось значение  $x_{r,s}$ , при котором  $h = 0$ . Проверялось условие

$$L \leq x_{r,s} < \Delta, \quad (9)$$

где  $\Delta$  – допустимая погрешность в определении  $L$ .

Варьирование  $S_{r,s}$  прекращалось при выполнении условия (9) и производился переход к следующему значению  $B_r$ . Графическое представление результатов вычислений ( $\Delta = 0,02$ ) приведены на рис. 2.

Аппроксимация расчетных значений выполнена линейной функцией (см. рис. 2)

$$S = 0,7544B + 5,2163. \quad (10)$$

Погрешность аппроксимации менее 3 %, кроме значения при  $B = 0,2$ , где она составляет 5,2 %.

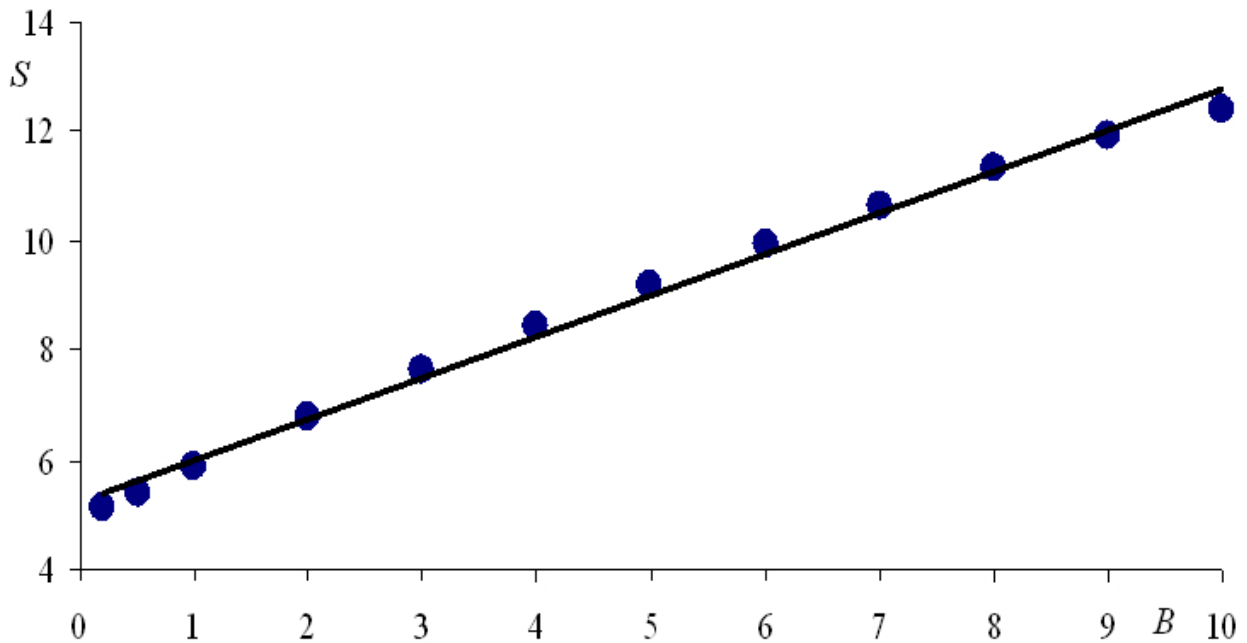


Рисунок 2 – Рациональные значения геометрического комплекса  $S$ , при которых обеспечивается заданная длина  $L$  растекания пульпы с числом Бингама  $B$ :  
 • – расчетные значения; — — аппроксимация

Формула (10) позволяет определить значение геометрического комплекса  $S$ , при котором обеспечивается заданная длина растекания пульпы с числом Бингама  $B$ .

Подставляя в (10) выражения для определения  $S$  и  $B$ , получим

$$\frac{L}{H} \operatorname{tg} \alpha = 0,7544 \frac{\tau_0 L}{\rho g H^2 \cos \alpha} + 5,2163. \quad (11)$$

Решая (11) относительно  $H$ , определим начальную высоту слоя пульпы

$$H = 0,0383 \frac{L}{\cos \alpha} \left( 2,5 \sin \alpha + \sqrt{6,25 \sin^2 \alpha - 98,3794 \frac{\tau_0 \cos \alpha}{\rho g L}} \right).$$

Поскольку угол наклона  $\alpha$  мал, то (11) представим в таком виде

$$\frac{L}{H} \alpha = 0,7544 \frac{\tau_0 L}{\rho g H^2} + 5,2163. \quad (12)$$

Из уравнения (12) определим угол наклона плоскости

$$\alpha = 0,7544 \frac{\tau_0}{\rho g H} + 5,2163 \frac{H}{L}.$$

Результаты численных экспериментов по изучению изменения высоты  $\tilde{h}$  слоя пульпы вдоль координаты  $\tilde{x}$  (рис. 3), позволяют сделать вывод: несмотря на варьирование рациональных значений числа Бингама и геометрического комплекса  $S$ , вид функции  $\tilde{h}(\tilde{x})$  сохраняется.

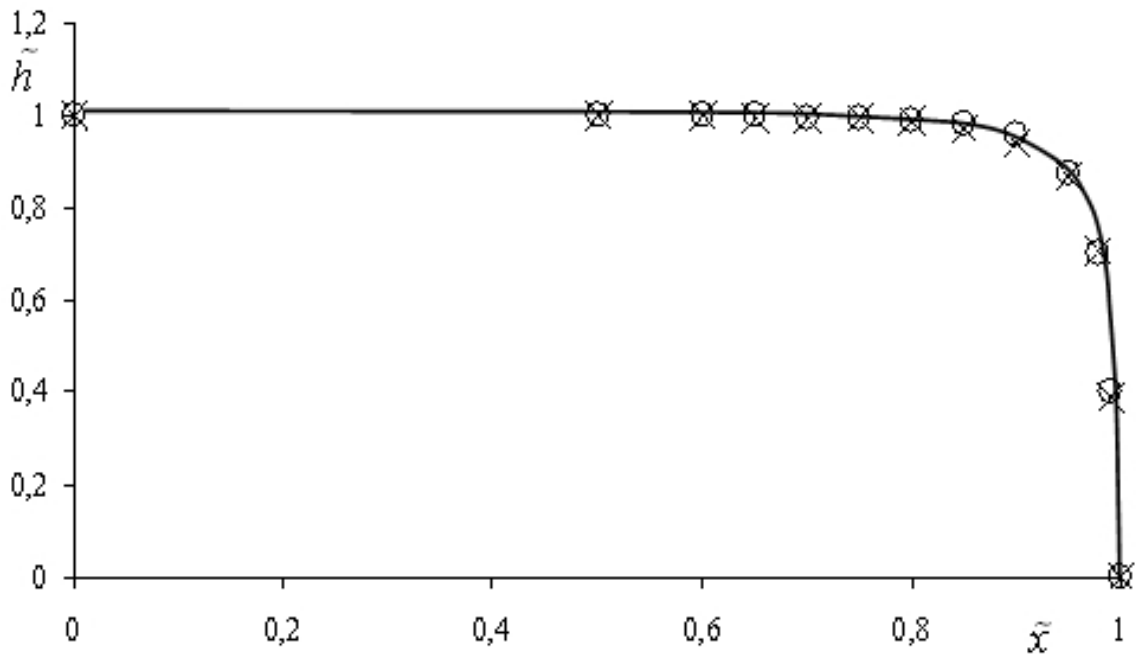


Рисунок 3 – Изменение высоты  $\tilde{h}$  потока пульпы по координате  $\tilde{x}$ :  
 O – при  $B = 0,2$  и  $S = 5,1$ ; × – при  $B = 10$  и  $S = 12,38$

При этом площадь  $\tilde{F}$  сечения слоя ПОО (в плоскости  $xOz$ ), которая определялась численным интегрированием  $\tilde{h}(\tilde{x})$  в пределах изменения  $\tilde{x}$  от 0 до 1 (табл. 1) также можно считать неизменной, поскольку с вероятностью 0,95 справедлива статистическая гипотеза, что все значения  $\tilde{F}$  принадлежат одной генеральной совокупности со средним значением 0,9633.

Переходя к размерным величинам, получим площадь сечения

$$F = LH\tilde{F} . \quad (13)$$

где  $\tilde{F}$  – безразмерная площадь, которую примем равной 0,96 (см. табл. 1).

Масса отходов, приходящаяся на один погонный метр по координате  $y$ , с учетом (13) определяется так

$$m = 0,96\rho CLH . \quad (14)$$

где  $C$  – массовая концентрация пульпы.

Таблица 1 – Площадь  $\tilde{F}$  сечения пульпы при различных  $B$  и  $S$ 

Число Бингама $B$	Комплекс $S$	Площадь $\tilde{F}$
0,2	5,100	0,9660
0,5	5,400	0,9659
1,0	5,890	0,9657
2,0	6,790	0,9657
3,0	7,660	0,9646
4,0	8,440	0,9644
5,0	9,200	0,9633
6,0	9,920	0,9624
7,0	10,620	0,9609
8,0	11,310	0,9588
9,0	11,908	0,9592
10,0	12,380	0,9627

Следует акцентировать внимание, что формула (14) справедлива при рациональных значениях числа Бингама и геометрического комплекса  $S$ , при которых обеспечивается течение пульпы с начальной высотой  $H$  на расстояние  $L$ .

Время, необходимое для растекания по склону длиной  $L$ , определим по характеристической скорости  $U$

$$t_L = \frac{L}{U} = \frac{\eta}{\rho g H \varepsilon^2 \cos \alpha}.$$

**Выводы.** Растекание пульпы с концентрацией пасты по склону хранилища отходов моделировалось ползущим течением среды Бингама-Шведова. С использованием этой модели, на основе метода возмущений определены расстояние перемещения фронта пульпы и масса отходов, зависящие от числа Бингама и геометрического комплекса. Показано, что при рассредоточенной подаче течение пульпы по склону зависит от реологических и геометрических параметров, которые характеризуются числом Бингама и введенным геометрическим комплексом.

Полученные результаты планируется использовать при разработке перспективных технологий транспортирования и складирования отходов обогащения в виде пасты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевцов, Н.С. Разработка методики обоснования параметров горнотехнических систем с намывными сооружениями при освоении железорудных месторождений: дис... канд. техн. наук: 25.00.22; 25.00.21 / Шевцов Н.С. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2013. – 120 с.
2. Гальперин, А.М. Геомеханика открытых горных работ / А.М. Гальперин. – М.: МГГУ, 2003. – 473 с.
3. Зверевич, В.В. Водовоздушное хозяйство обогатительных фабрик / В.В. Зверевич, В.А. Перов. – М.: Недра, 1976. – 199 с.
4. Чуянов, Г.Г. Хвостохранилища и очистка сточных вод / Г.Г. Чуянов. – Екатеринбург: Изд.



УГГТА, 1998. – 246 с.

5. Воронов, Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод / Ю.В. Воронов, С.В. Яковлев.– М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006 – 704 с.

6. Balmforth, N.J. A consistent thin-layer theory for Bingham plastics / N.J. Balmforth, R.V. Craster // J. Non Newtonian Fluid Mech., 1999. – Vol.84. – P. 65–81.

7. Liu, J. Stability of viscoplastic flow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.who.edu/page.do?pid=13016>.

8. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения [Текст] / [Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семеновко.] – Севастополь: «Вебер», 2002. – 247 с.

9. Трубопроводный гидротранспорт твердых сыпучих материалов [Текст] / [Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили, С.И. Криль, Л.А. Смойловская.] – Тб.: «Мецниереба», 2006. – 350 с.

10. Временные указания по технологии возведения намывных хвостохранилищ горнообогатительных комбинатов (РСН 275 – 75). – Киев: Госстрой УССР, 1975. – 180 с.

## REFERENCES

1. Shevtsov, N.S. (2013), Development of methodology for study parameters with alluvial mining systems structures during the development of iron ore deposits, Ph.D. Thesis, G.I. Nosova MGTU, Magnitogorsk, RU.

2. Galperin, A.M. (2003), *Geomehanika otkrytyih gorniyh rabot* [Geomechanics opencast mining], MGGU, Moscow, Russia.

3. Zverevich, V.V., Perov V.A. (1976) *Vodovozdushnoe hozyaystvo obogatitelnykh fabrik* [Water and air sector enrichment plants], Nedra, Moscow, Russia.

4. Chuyanov, G.G.(1998) *Hvostokhranilishcha i ochistka stochnykh vod* [Tailing dumps and waste water treatment], UGGTA, Ekaterinburg, Russia.

5. Voronov, Yu.V., Yakovlev, S.V. (2006) *Vodootvedenie i ochistka stochnykh vod* [Collection and treatment of wastewater], Publisher Association Building universities, Moscow, Russia.

6. Balmforth, N.J., Craster, R.V.(1999) “A consistent thin-layer theory for Bingham plastics”, J. Non Newtonian Fluid Mech., no.84, pp. 65–81.

7. Liu, J. Stability of viscoplastic flow [Electronic]. – available at: <https://www.who.edu/page.do?pid=13016>.

8. Zvyagilskiy, E.L., Bljuss, B.A., Nazimko, E.I., Semenenko, E.V., (2002), *Sovershenstvovanie rezhimov raboty gidrotransportnykh ustanovok tekhnologiy ugleobogashcheniya*, [Improvement of operating modes of hydrotransport installations of technologies of coal preparation], Weber, Sevastopol, Ukraine.

9. Maharadze, L.I., Gochitashvili, T.Sh., Krill, S.I., Smoylovskaya, L.A., (2006), *Truboprovodnyy gidrotransport tverdykh syupuchikh materialov*, [Pipeline hydrotransport of firm bulks], Tbilisi, P. 350.

10. [Temporary instructions on technology of construction of alluvial tailings dams of mining and processing integrated works], Kiev, USSR State Committee for Construction, (1975), Ukraine.

---

## Об авторах

**Семеновко Евгений Владимирович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [igtmnanu@yandex.ru](mailto:igtmnanu@yandex.ru)

**Лапишин Евгений Семенович**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [igtmnanu@yandex.ru](mailto:igtmnanu@yandex.ru)

**Киричко Сергей Николаевич**, аспирант Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [igtmnanu@yandex.ru](mailto:igtmnanu@yandex.ru)

### About the authors

**Semenenko Eugeny Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Senior Researcher at the Institute of Geotechnical Mechanics, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [igtmnanu@yandex.ru](mailto:igtmnanu@yandex.ru)

**Lapshin Evgeniy Semenovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Principal Researcher at the Institute of Geotechnical Mechanics, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [igtmnanu@yandex.ru](mailto:igtmnanu@yandex.ru)

**Kirichko Sergey Nikolayevich**, doctoral Student at the Institute of Geotechnical Mechanics, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [igtmnanu@yandex.ru](mailto:igtmnanu@yandex.ru)

**Анотація.** Предмет досліджень - течія пастоподібної пульпи по схилу сховища відходів. Мета роботи - визначити відстань, на яку відбувається переміщення фронту пульпи по схилу сховища, і маси складованих відходів.

Розтікання пастоподібної пульпи по схилу сховища відходів моделювалося повзучим плином середовища Бінгама-Шведова. Диференціальне рівняння, яке описує зміну висоти шару, вирішувалося чисельним методом Рунге-Кутта-Фелберга 4-5 порядку. Вперше визначено співвідношення між числом Бінгама і геометричним комплексом (враховує довжину, кут нахилу схилу сховища і початкову висоту шару пульпи), при якому забезпечується переміщення фронту пульпи на задану відстань.

Отримані результати планується використати при розробці перспективних технологій транспортування і складування відходів збагачення у вигляді пасти.

Ключові слова: відходи, паста, розосереджена подача, течія, схил сховища, маса відходів

**Abstract.** The subject of research is flow of paste-like pulp along the slope of waste storage. The purpose of research is determination of distance of shift of the pulp front along the slope of waste storage and of storing cleaning rejects mass. Spreading of paste-like pulp along the slope of waste storage was simulated by creeping flow of Bingham-Shvedov medium. Differential equation describing bed height change was solved by Runge-Kutta-Felberg numerical method of 4-5<sup>th</sup> order. The relation between Bingham number and geometric complex, which ensures pulp front shift to given distance, first was obtained. The length and angle of inclination of the slope of waste storage as well as initial pulp bed height were taken into account by geometric complex. Obtained results are planned to use during elaboration of prospective technologies of transportation and stocking of cleaning rejects in the form of paste.

**Keywords:** cleaning rejects, paste, distributed delivery, flow, slope of waste storage, cleaning rejects mass.

*Статья поступила в редакцию 30.06.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В. И. Дырдой*