

УДК 622.648.2:621.867.81:622.002.5

**Семененко Е.В.**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**Медведева О.А.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**Киричко С.Н.**, канд. техн. наук  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ВОРОНКИ ВСАСЫВАНИЯ С УЧЕТОМ КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ГИДРОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ**

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

## **ОЦІНКА РОЗМІРІВ ВОРОНКИ ВСМОКТУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ КРИТИЧНОЇ ШВИДКОСТІ ГІДРОТРАНСПОРТУВАННЯ**

**Semenenko E.V.**, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher,  
**Medvedeva O.A.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,  
**Kyrychko S.N.**, Ph.D. (Tech.)  
(IGTM NAS of Ukraine)

## **ASSESSMENT OF SUCTION HOPPER SIZES TO FIT THE CRITICAL SPEED OF HYDROTRANSPORTATION**

**Аннотация.** Эффективность технологии добычи россыпей во многом определяется процессом поступления взвешенного или размываемого грунта во всасывающий трубопровод, а также параметрами сверхкритического режима течения гидросмеси во всасывающем трубопроводе. Исследованы зависимости параметров гидротранспорта от свойств трубопровода и транспортируемого материала. Из известных методик выведены выражения для расчета размывающей скорости, которые описывают зависимость геометрических параметров, объема и времени образования воронки всасывания от критической скорости гидротранспортирования во всасывающем трубопроводе. Впервые получены оценки интервалов изменения геометрических параметров, объема и времени образования воронки всасывания при реализации различных режимов гидротранспортирования.

**Ключевые слова:** гидротранспорт, критическая скорость, воронка всасывания, подводный намыв.

**Введение.** В настоящее время перспективным направлением разработки первичных и техногенных россыпей из-под слоя воды является применение трубопроводного гидротранспорта [1 – 5]. Эффективность технологии добычи россыпей во многом определяется процессом поступления взвешенного или размываемого грунта во всасывающий трубопровод, а также параметрами сверхкритического режима течения гидросмеси во всасывающем трубопроводе. При этом технологические параметры добычи зависят от геометрических размеров воронки всасывания, зависимость которых от критической скорости гидротранспортирования и параметров гидротранспортирования до настоящего

времени не изучена [6 – 11]. Анализ известных методов расчета параметров воронок, образующихся на входе во всасывающий трубопровод земснаряда [1 – 5, 12], указывает на доминирование в них эмпирических зависимостей, а также формул, полученных на основе теории размерности. Известны немногочисленные теоретические исследования процессов течения в рассматриваемой области и единичные попытки построения математической модели процесса [5, 6, 13, 14], опирающиеся на экспериментальные константы и содержащие предположения, которые научно не обоснованы. Однако все эти методики рассматривают параметры воронки всасывания и процесса всасывания грунта без учета критических параметров гидротранспортирования.

**Целью** публикации является установление зависимости геометрических параметров, объема и времени образования воронки всасывания от критической скорости гидротранспортирования во всасывающем трубопроводе.

**Изложение материала.** Известны результаты оценки геометрических параметров, объема и времени образования воронки всасывания в зависимости от технологических характеристик земснаряда (рис. 1) [14], полученные на основе результатов визуализации процесса течения возле входа во всасывающий трубопровод земснаряда [1 – 5], а также известных положений и гипотез технической гидродинамики [7, 8 – 15]:

$$R(\theta) = \frac{2D\zeta}{\sqrt[4]{\sin \theta}},$$

$$R_D = \frac{D\zeta^{4/3}}{0,315},$$

$$R_0 = \zeta \frac{D}{2},$$

$$\theta_D = \arcsin \left[ \left( \frac{0,25}{\zeta} \right)^{4/3} \right],$$

$$W = \frac{64\pi}{3} D^3 \Omega(\zeta),$$

$$T_W = \frac{D}{w} \frac{\varepsilon(\sigma)}{0,609},$$

$$\Omega(\zeta) = \zeta \left( 1 + \frac{3}{64} \sqrt[3]{\frac{\zeta}{2}} \right),$$

$$\varepsilon(\sigma) = \frac{52}{\sigma} \left( 1 + \sqrt{\frac{\sigma}{52}} \right)^2,$$

$$\zeta = 1,07 \left( 1 + \sqrt{\frac{\sigma}{52}} \right)^2,$$

$$\sigma = \frac{4Q}{\pi D^2 w},$$

где  $\theta$  – текущая угловая координата  $\theta_D < \theta < \frac{\pi}{2}$  (рис. 1);  $R$  – текущий радиус воронки всасывания;  $R_D$  – глубина воронки всасывания;  $w$  – угловая проекция размывающей скорости;  $R_0$  – радиус воронки всасывания по верхнему краю;  $\theta_D$  – угловая координата, соответствующая проекции внешней стороны трубопровода на дно воронки всасывания (рис. 1);  $\zeta$  – коэффициент, учитывающий условия всасывания;  $\sigma$  – параметр всасывания, определяемый как отношение скорости течения во всасывающем трубопроводе к угловой проекции размывающей скорости;  $W$  – суммарный объем воронки всасывания;  $T_W$  – время образования воронки всасывания.

В приведенных зависимостях формула для определения параметра всасывания может быть переписана в следующем виде:

$$\sigma = k \sigma_{kp},$$

$$\sigma_{kp} = \frac{V_{kp}}{w},$$

$$k = \frac{V}{V_{kp}},$$

где  $k$  – параметр гидротранспортирования [6];  $\sigma_{kp}$  – минимально возможное значение параметра всасывания;  $V_{kp}$  – критическая скорость гидротранспортирования во всасывающем трубопроводе.

Представление величины  $\sigma$  в предлагаемом виде позволяет увязать расчет параметров процесса забора грунта с расчетом параметров гидротранспорта, поскольку при определении производительности насосной установки по гидро-смеси критическая скорость рассчитывается до определения гидравлического уклона.

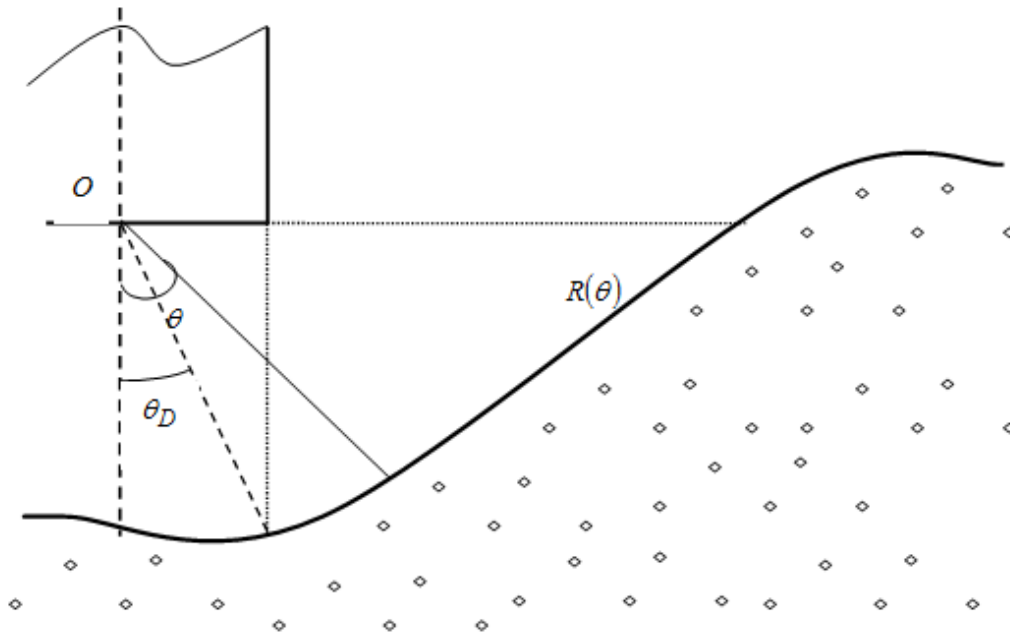


Рисунок 1 – Схема течения в воронке всасывания грунтозаборного устройства [14]

Поскольку авторы работы [14] предлагают использовать неявную зависимость геометрических параметров, объема и времени образования воронки всасывания от параметра всасывания, представленные зависимости были аппроксимированы следующими функциями (рис. 2 – 4):

$$\frac{R}{D} = \frac{7,663}{\sqrt[4]{\sin \theta}} \sigma^{0,7054},$$

$$\frac{R_D}{D} = \frac{\sigma^{0,9406}}{0,053},$$

$$\frac{R_0}{D} = \frac{\sigma^{0,7054}}{0,522},$$

$$\theta_D = \frac{1,5062}{\sigma^{0,9406}},$$

$$\frac{W}{D^3} = \frac{\sigma^{0,7255}}{0,0037},$$

$$\frac{T_W V_{kp}}{D} = \frac{305,7 \sigma_{kp}}{\sigma^{0,2946}}.$$

При  $k = 1$  во всасывающем и напорном трубопроводах наступает критиче-

ский режим течения, который характеризуется минимально возможными скоростями. Следовательно, величины геометрических параметров, объема и времени образования воронки всасывания, соответствующие этому режиму течения, будут минимально возможными. В практике расчетов параметров гидротранспорта максимальная величина параметра гидротранспортирования не превышает 2,5 или 3, поскольку при больших значениях существенно повышаются потери напора. Следовательно, параметры воронки всасывания и процесса грунтозабора, соответствующие этим значениям  $k$ , будут максимально возможными для рассматриваемых условий.

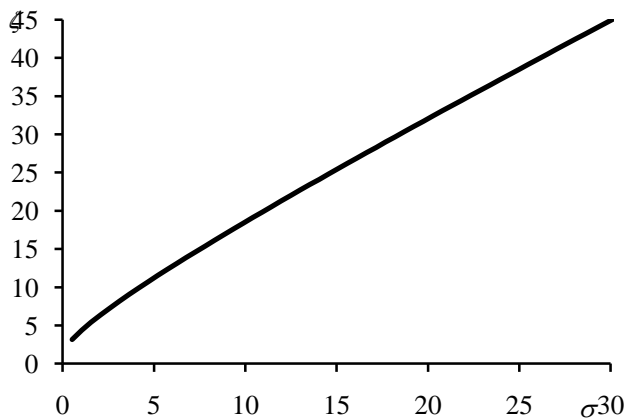


Рисунок 2 – Зависимость величины  $\zeta$  от параметра всасывания

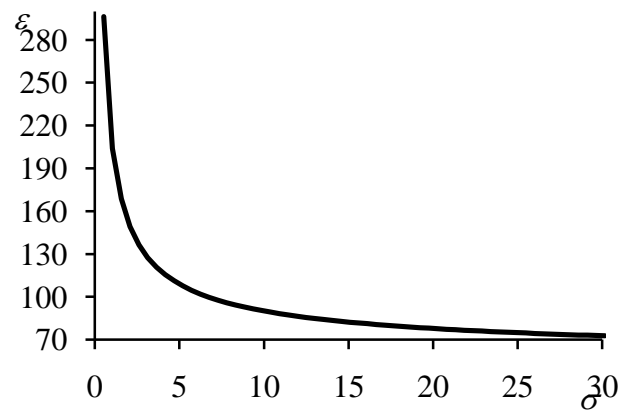


Рисунок 3 – Зависимость величины  $\varepsilon$  от параметра всасывания

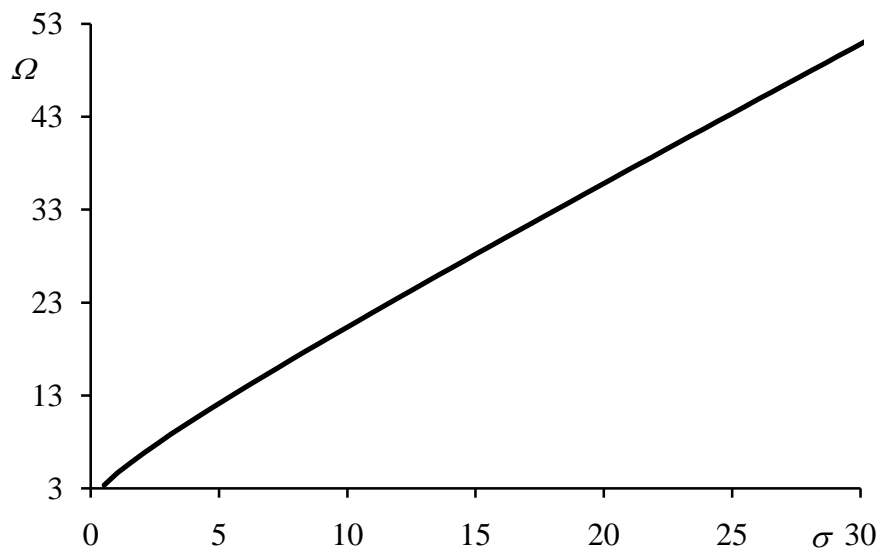


Рисунок 4 – Зависимость величины  $\Omega$  от параметра всасывания

Таким образом, величина параметра всасывания с учетом ограничений со стороны режимов гидротранспортирования будет изменяться в следующем интервале

$$\sigma_{kp} \leq \sigma \leq 3\sigma_{kp},$$

а величины геометрических параметров, объема и времени образования ворон-

ки всасывания будут ограничиваться такими двойными неравенствами

$$\frac{7,663}{\sqrt[4]{\sin \theta}} \sigma_{kp}^{0,7054} \leq \frac{R}{D} \leq \frac{16,633}{\sqrt[4]{\sin \theta}} \sigma_{kp}^{0,7054},$$

$$\frac{\sigma_{kp}^{0,9406}}{0,053} \leq \frac{R_D}{D} \leq \frac{\sigma_{kp}^{0,9406}}{0,019},$$

$$\frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,522} \leq \frac{R_0}{D} \leq \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,254},$$

$$\frac{0,536}{\sigma_{kp}^{0,9406}} \leq \theta_D \leq \frac{1,506}{\sigma_{kp}^{0,9406}},$$

$$\frac{\sigma_{kp}^{0,7255}}{0,0037} \leq \frac{W}{D^3} \leq \frac{\sigma_{kp}^{0,7255}}{0,0017},$$

$$\frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,0046} \leq \frac{T_W V_{kp}}{D} \leq \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,0033}.$$

Отметим, что по приведенным формулам нетрудно оценить с инженерной точностью как ширину интервала изменения величин

$$\frac{\Delta R}{D} = \frac{8,97}{\sqrt[4]{\sin \theta}} \sigma_{kp}^{0,7054},$$

$$\frac{\Delta R_D}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,9406}}{0,029},$$

$$\frac{\Delta R_0}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,472},$$

$$\Delta \theta_D = \frac{0,97}{\sigma_{kp}^{0,9406}},$$

$$\frac{\Delta W}{D^3} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7255}}{0,003},$$

$$\frac{\Delta T_W V_{kp}}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,012},$$

так и их средние значения

$$\frac{\tilde{R}}{D} = \frac{4,33}{\sqrt[4]{\sin \theta}} \sigma_{kp}^{0,7054},$$

$$\frac{\tilde{R}_D}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,9406}}{0,101},$$

$$\frac{\tilde{R}_0}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,711},$$

$$\tilde{\theta}_D = \frac{1,253}{\sigma_{kp}^{0,9406}},$$

$$\frac{\tilde{W}}{D^3} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7255}}{0,007},$$

$$\frac{\tilde{T}_W V_{kp}}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,0066}.$$

Из приведенных формул видно, что текущие величины геометрических параметров, объема и времени образования воронки всасывания, их средние значения и ширина интервала изменения определяются, прежде всего, минимально возможным значением параметра всасывания.

Для гидросмесей с концентрациями, при которых не проявляются вязкопластические свойства, расчет величины  $\sigma_{kp}$  можно производить на основе рекомендаций по определению критической скорости гидротранспортирования, предложенных А.П. Юфиным [7] и сотрудниками ИГМ НАН Украины, с учетом уточнений, сделанных специалистами ИГТМ НАН Украины [8 – 11]. Если гидросмесь при расчетных концентрациях проявляет вязкопластические свойства, то расчет величины  $\sigma_{kp}$  необходимо проводить, определяя критическую скорость по следующей формуле

$$V'_{kp} = \frac{(1 - 0,569k_z)^4}{0,779k_z} \frac{\rho g}{\eta D^2} \left( \frac{\tau_0}{\rho g} \right)^4 \left( \frac{L}{Z} \right)^3,$$

где  $\tau_0$  – начальное касательное напряжение гидросмеси;  $\eta$  – эффективная вязкость гидросмеси;  $\rho_0$  – плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\pi$  – константа, равная 3,14;  $k_z$  – коэффициент местных гидравлических сопротивлений;  $L$  – длина магистрали;  $Z$  – разница геодезических высот конца и начала магистрали.

При этом для определения размывающей скорости рекомендуется [5] использовать результаты Дюбуа, М.А. Великанова, В.Н. Гончарова, Д.В. Розщупкина [12].

**Выводы.** В результате совместного рассмотрения математической модели течения воды со взвешенными твердыми частицами в области между входом во всасывающий трубопровод и размываемым грунтом, зависимостей параметров гидротранспорта от свойств трубопровода и транспортируемого материала, а также известных формул для расчета размывающей скорости выведены выражения, которые описывают зависимость геометрических параметров, объема и времени образования воронки всасывания от критической скорости гидротранспортирования во всасывающем трубопроводе. Это позволило впервые оценить изменение геометрических параметров, объема и времени образования воронки всасывания при реализации различных режимов гидротранспортирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нурок, Г.А. Гидромеханизация горных работ / Г.А. Нурок. – М.: Госгортехиздат, 1959. – 391 с.
2. Нурок, Г.А. Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ / Г.А. Нурок. – М.: Недра, 1985. – 583 с.
3. Нурок, Г.А. Гидромеханизация открытых разработок / Г.А. Нурок. – М.: Недра, 1970. – 584 с.
4. Нурок, Г.А. Технология и проектирование гидромеханизации горных работ / Г.А. Нурок. – М.: Недра, 1965. – 210 с.
5. Франчук, В.П. Моделирование подводного забоя, образованного струйным грунтозаборным устройством / В.П. Франчук, А.А. Бондаренко // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, 2014. - №83. – С. 10 - 17.
6. Семененко, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титанцирконовых россыпей / Е.В. Семененко. – Киев: Наукова думка, 2011. – 232 с.
7. Юфин, А.П. Гидромеханизация / А.П. Юфин. – М.: Стройиздат, 1965. – 496 с.
8. Силин, Н.А. Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов / Н.А. Силин, С.Г. Коберник. – К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 215 с.
9. Карасик, В.М. Напорный гидротранспорт песчаных материалов / В.М. Карасик, И.А. Асауленко. – Киев: Наукова думка, 1966. – 106 с.
10. Карасик, В.М. Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов / В.М. Карасик, И.А. Асауленко, Ю.К. Витошкин. – К.: Наукова думка, 1976. – 156 с.
11. Коберник, С.Г. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов / С.Г. Коберник, В.И. Войтенко. – К.: Наукова думка, 1967. – 140 с.
12. Великанов, М.А. Руслевой процесс / М.А. Великанов. – М.: Гостехиздат, 1958. – 396 с.
13. Семененко, Е.В. Проектировочный расчет трубопроводных систем технологий гидромеханизации при замене стальных труб полиэтиленовыми / Е.В. Семененко, Н.А. Никифорова, Л.Г. Татарко



// Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины.– Днепропетровск, – 2015. – Вып. 120.– С. 152–161.

14. Медведева, О.А. Определение размеров воронки всасывания для подводных технологий разработки россыпных месторождений / О.А. Медведева // Підводні технології: Міжн. наук.-вироб. журн. / КНУБА. – Київ, – №3. – 2016. – С. 47 – 53.

15. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – [5-е изд., перераб.]. – М.: Глав. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1978. – 736 с.

#### REFERENCES

1. Nurok, G.A. (1959), *Gidromekhanizatsiya gornyykh robot* [Hydromechanization mining operations], Gosgortekhzdat, Moscow, USSR.

2. Nurok, G.A. (1985), *Protsessy i tekhnologii gidromekhanizatsii otkrytykh gornyykh robot* [Processes and technologies jetting open pit mining], Nedra, Moscow, USSR.

3. Nurok, G.A., (1970), *Gidromekhanizatsyya otkrytykh razrabotok* [Hydromechanization opencast], Nedra, Moscow, USSR.

4. Nurok, G.A. (1959), *Tekhnologiya i proektirovanie gidromekhanizatsii gornyykh robot* [Technology and design of hydro mechanization of mining operations], Nedra, Moscow, USSR.

5. Franchuk, V.P. and Bondarenko, A.A. (2015), “Simulation of underwater face, formed by spray primer Intake”, *Mining, construction, road and agricultural machines*, no. 83, pp.10 – 17.

6. Semenenko, E.V. (2011), *Nauchnye osnovy tekhnologiy gidromekhanizatsii otkrytoy razrabotki titan-tsirkonovykh rossypanykh* [Scientific bases of technology jetting open development of titanium-zirconium placers], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

7. Yufin, A.P. (1966), *Gidromekhanizatsiya* [Hydromechanization], Gosstroyizdat, Moscow, USSR.

8. Silin, N.A. (1962), *Rezhimy raboty krupnykh zemlesosnykh snaryadov i truboprovodov* [Modes of operation of large dredge and pipeline], AS SSR of Ukraine, Kiev, USSR.

9. Karasik, V.M. and Asaulenko, I.A. (1966), *Naporniy gidrotransport peschanykh materialov* [Pressure hydrotransport sandy materials], Naukova dumka, Kiev, USSR.

10. Karasik, V.M., Asaulenko, I.A. and Vitoshkin, Yu.K. (1976), *Intensifikatsiya gidrotransporta produktov i otkhodov obogashcheniya gorno-obogatitelnykh kombinatov* [Intensification hydrotransport products and tailings mining and processing], Naukova dumka, Kiev, USSR.

11. Kobernik, S.G. and Voitenko, V.I. (1967), *Naporniy gidrotransport khvostov gorno-obogatitelnykh kombinatov* [Pressure hydraulic transport of tailings mining and processing], Naukova dumka, Kiev, USSR.

12. Velikanov, M.A. (1958), *Rusloviy protsess* [Channel process], Gostekhzdat, Moscow, USSR.

13. Semenenko, E.V., Nikiforova, N.A. and Tatarko, L.G. (2015), “Engineering calculation of pipeline jetting technology systems by replacing steel pipes with plastic”, *Geo-Technical Mechanics*, vol. 120, pp. 152-161.

14. Medvedeva, O.A. (2016), “Determining the size of the suction funnel for underwater placer mining technology”, *Pidvodni tekhnologii*, no. 3, pp. 47-53.

15. Lojcyanskiy, L.G. (1978), *Mekhanika zhydkosti i gaza* [Fluid Mechanics], Nauka, Moscow, USSR.

#### Об авторах

**Семененко Евгений Владимирович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, [evs\\_igtm@mail.ru](mailto:evs_igtm@mail.ru).

**Медведева Ольга Алексеевна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе геодинамических систем и вибрационных технологий, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, [olya-1702@yandex.ua](mailto:olya-1702@yandex.ua)

**Киричко Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, младший научный сотрудник в отделе геодинамических систем и вибрационных технологий, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, [evs\\_post@meta.ua](mailto:evs_post@meta.ua).

### About the authors

**Semenenko Evgeniy Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Senior Researcher, Head of Department of Mine Energy Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, [evs\\_igtm@mail.ru](mailto:evs_igtm@mail.ru).

**Medvedeva Olga Alekseevna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, [olya-1702@yandex.ua](mailto:olya-1702@yandex.ua).

**Kyrychko Sergey Nikolaevich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Junior Researcher in Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, [evs\\_post@meta.ua](mailto:evs_post@meta.ua).

---

**Анотація.** Ефективність технології видобутку розсипів багато в чому визначається процесом надходження зваженого або ґрунту, що розмивається, в усмоктувальний трубопровід, а також параметрами понадкритичного режиму течії гідросуміші у всмоктувальному трубопроводі. Досліджено залежності параметрів гідротранспорту від властивостей трубопроводу і матеріалу, який транспортується. З відомих методик виведено вирази для розрахунку швидкості розмивання, які описують залежність геометричних параметрів, обсягу і часу утворення воронки всмоктування від критичної швидкості гідротранспортування у всмоктувальному трубопроводі. Вперше отримані оцінки інтервалів зміни геометричних параметрів, обсягу і часу утворення воронки всмоктування при реалізації різних режимів гідротранспортування.

**Ключові слова:** гідротранспорт, критична швидкість, воронка всмоктування, підводний намів.

**Abstract.** Efficiency placer mining technology is largely determined by process of suspended or eroded soil going to the suction pipe, as well as parameters of supercritical regime of the slurry flowing in the suction line. The dependence between the hydraulic transport parameters of the pipeline and the properties of the transported material was studied. On the basis of known methods, the expressions were derived for calculating the eroding velocity, which described dependence of geometric parameters, volume and time of formation of the suction funnel on critical speed of hydrotransportation in the suction line. It is the first assessment of intervals of geometric parameters changes, volume and time of sucking funnel formation at different modes of hydrotransportation.

**Keywords:** hydraulic transport, the critical speed, suction hopper, underwater alluvium.

*Статья поступила в редакцию 12.09.2016*

*Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Блюссом Б.А.*