

УДК 622'17.004.4:621.796

**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,  
**Коваль Н.В.**, магистр  
(ИГТМ НАН Украины)

**РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ  
ГИДРОТРАНСПОРТНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ПОДВОДНОЙ  
РАЗРАБОТКЕ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

**Семененко Є.В.**, д-р техн. наук, ст. наук. співроб.,  
**Медведева О.О.**, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,  
**Киричко С.М.**, канд. техн. наук,  
**Коваль Н.В.**, магістр  
(ІГТМ НАН України)

**РАЦІОНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ І РЕЖИМИ РОБОТИ  
ГІДРОТРАНСПОРТНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ПІДВОДНІЙ РОЗРОБЦІ  
РОЗСИПНИХ РОДОВИЩ**

**Semenenko Ye.V.**, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher,  
**Medvedeva O.O.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,  
**Kirychko S.M.**, Ph.D. (Tech.),  
**Koval N.V.**, M.S. (Tech.)  
(IGTM NAS of Ukraine)

**RATIONAL PARAMETERS AND MODES OF HYDROTRANSPORT UNIT  
OPERATION AT UNDERWATER MINING OF ALLUVIAL DEPOSITS**

**Аннотация.** На сегодняшний день применение трубопроводного гидротранспорта является актуальным и перспективным направлением разработки первичных и техногенных россыпей из-под слоя воды. В статье получена оценка погонных потерь напора при условии неразубоживания добываемой техногенной россыпи. В результате проведенных исследований впервые обоснованы параметры земснаряда и насосов для гидротранспорта техногенной россыпи добываемой подводным способом, что позволило сформулировать условие минимума энергоемкости технологии добычи техногенных россыпей подводным способом. В работе сформулированы условия предотвращения разубоживания добываемого материала при подводной разработке россыпных месторождений при работе гидротранспортной установки в сверхкритическом режиме, что позволит осуществлять разработку техногенных месторождений сформированных в хранилищах отходов обогащения.

**Ключевые слова:** воронка всасывания, критический режим течения, мощность техногенной россыпи.

**Актуальность работы.** В настоящее время перспективным направлением разработки первичных и техногенных россыпей из-под слоя воды является применение трубопроводного гидротранспорта [1–6].

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 параметра гидротранспортирования до настоящего времени не изучена [6]. Отметим, что глубина разрабатываемого слоя определяется глубиной воронки всасывания, а ширина фронта работ и скорость перемещения земснаряда зависят от радиуса воронки по верху россыпи. Анализ известных методов расчета параметров воронок, образующихся на входе во всасывающий трубопровод земснаряда [4], 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 [4 -8], 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 и возможности разубоживания добываемой техногенной россыпи.

**Целью публикации** является установление зависимости возможных потерь напора во всасывающем трубопроводе и параметра гидротранспортирования от свойств добываемой техногенной россыпи, а также условий ее залегания и параметров технологии добычи.

**Обоснование зависимости параметра гидротранспортирования от параметров технологии добычи.** Параметр гидротранспортирования определяется как отношение фактической скорости гидросмеси к критическому для рассматриваемых условий значению [5]

$$k = \frac{V}{V_{kp}}, \quad (1)$$

где  $k$  – параметр гидротранспортирования [5];  $V$  – фактическая скорость во всасывающем трубопроводе;  $V_{kp}$  – критическая скорость гидротранспортирования во всасывающем трубопроводе [5 – 10].

Параметр гидротранспортирования определяет величину потерь напора и надежность процесса.

Известны результаты оценки геометрических параметров, объема и времени образования воронки всасывания в зависимости от технологических характеристик земснаряда (рис. 1) [6], полученные на основе результатов визуализации процесса течения возле входа во всасывающий трубопровод земснаряда [1 – 5], а также известных положений и гипотез технической гидродинамики [7 – 10]. В работах [9, 10], установлена зависимость этих величин от параметра всасывания, определяемый как отношение скорости течения во всасывающем трубопроводе к угловой проекции размывающей скорости, что позволило увязать

расчет параметров процесса забора грунта с расчетом параметров гидротранспорта, поскольку при определении производительности насосной установки по гидросмеси критическая скорость рассчитывается до определения гидравлического уклона [9, 10]

$$\frac{R_D}{D} = \frac{\sigma^{0,9406}}{0,053}, \quad (2)$$

$$\frac{R_0}{D} = \frac{\sigma^{0,7054}}{0,522}, \quad (3)$$

$$\theta_D = \frac{1,5062}{\sigma^{0,9406}}, \quad (4)$$

$$\frac{W}{D^3} = \frac{\sigma^{0,7255}}{0,0037}, \quad (5)$$

$$\sigma = k\sigma_{кр}, \quad (6)$$

$$\sigma_{кр} = \sqrt[3]{\frac{Gm}{\delta}} \sqrt[4]{\psi} \frac{\omega}{A}, \quad (7)$$

$$\omega = \frac{\rho(6,06 + 4,04C) - 4,04C}{C + (1 - C)\rho}, \quad (8)$$

$$\delta = \frac{\Delta}{D}, \quad (9)$$

$$Gm = \frac{v}{\sqrt{gd_{cp}^3}}, \quad (10)$$

$$\psi = \frac{u_{cp}}{\sqrt{gd_{cp}}} \left( \frac{3d_{10}}{d_{90}} \right)^{0,4}, \quad (11)$$

$$A = \sqrt{14 + \frac{5}{d_{cp}^2}}, \quad (12)$$

где  $R_D$  – глубина воронки всасывания;  $R_0$  – радиус воронки всасывания по верхнему краю;  $\theta_D$  – угловая координата, соответствующая проекции внешней стороны трубопровода на дно воронки всасывания (рис. 1) [9, 10];  $\sigma$  – параметр всасывания, определяемый как отношение скорости течения во всасывающем трубопроводе к угловой проекции размывающей скорости;  $W$  – суммарный

объем воронки всасывания;  $k$  – параметр гидротранспортирования [5];  $\sigma_{kp}$  – минимально возможное значение параметра всасывания;  $C$  – массовая доля твердого в пульпе;  $\rho$  – относительная плотность транспортируемого материала;  $\Delta$  – абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубопровода;  $u_{cp}$  – гидравлическая крупность транспортируемого материала;  $d_{10}$  и  $d_{90}$  – диаметры частиц, соответствующие 10- и 90%-ному содержанию фракций по кривой гранулометрического состава;  $d_{cp}$  – средневзвешенный диаметр частиц транспортируемого материала.

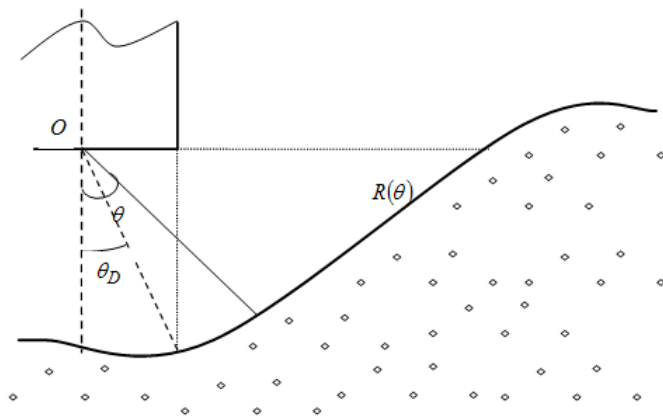


Рисунок 1 - Схема течения пульпы в воронке всасывания грунтозаборного устройства [7, 10]

Одним из главных требований к технологиям разработки подводных россыпных месторождений является предотвращение разубоживания добываемого материала, которое происходит за счет вовлечения во всасывающий трубопровод подстилающих россыпь материалов. Что бы этого не происходило, требуют, чтобы глубина воронки всасывания не превышала мощность пласта россыпи

$$R_D = k_H H, \quad (13)$$

где  $k_H$  – коэффициент запаса, из условия не разубоживания не превосходит единицы [9, 10];  $H$  – мощность россыпи.

Если разубоживание техногенной россыпи не является критичным условием, то величина  $k_H$  может превышать единицу [9, 10].

Совместное рассмотрение вышеприведенных формул позволяет обосновать требуемую из условий подводной технологии добычи техногенной россыпи величину коэффициента гидротранспортирования

$$k = \frac{0,044}{\sigma_{kp}} \Gamma^{1,063}, \quad (14)$$

$$\Gamma = \frac{k_H H}{D}, \quad (15)$$

где  $\Gamma$  – параметр технологии добычи.

$$\Gamma > \Gamma_{kp}, \quad (16)$$

$$\Gamma_{kp} = \frac{\sigma_{kp}^{0,941}}{0,053}, \quad (17)$$

где  $\Gamma_{kp}$  – минимально допустимое значение параметра технологии добычи.

С учетом последнего выражения нетрудно показать, что параметр всасывания и другие характеристики воронки всасывания будут рассчитываться по следующим формулам (рис. 2 – 4)

$$\sigma = 0,044\Gamma^{1,063}, \quad (18)$$

$$\frac{R_D}{D} = \Gamma, \quad (19)$$

$$\frac{R_0}{D} = 0,212\Gamma^{0,75}, \quad (20)$$

$$\theta_D = \frac{28,44}{\Gamma}, \quad (21)$$

$$\frac{W}{D^3} = 28,03\Gamma^{0,771}. \quad (22)$$

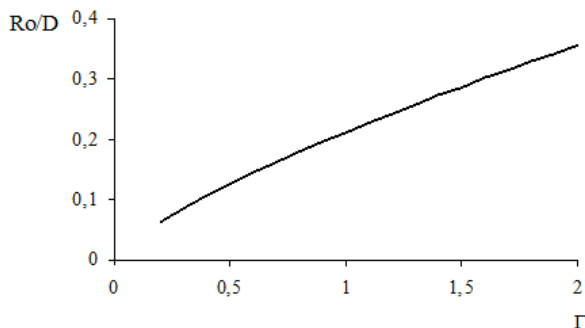


Рисунок 2 - Зависимость относительного радиуса воронки по верхнему краю от параметра  $\Gamma$

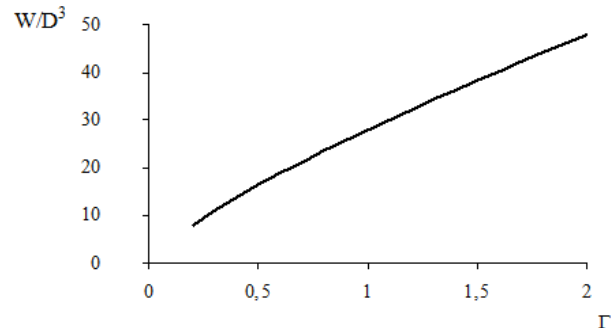


Рисунок 3 - Зависимость относительного суммарного объема воронки от параметра  $\Gamma$

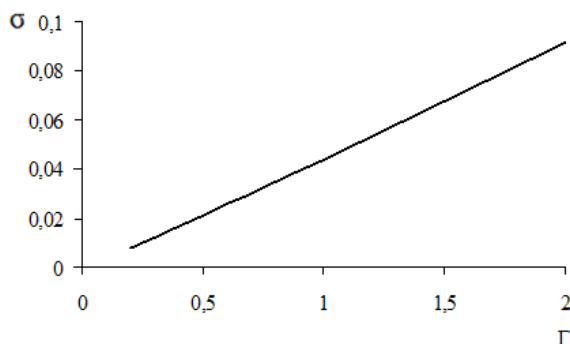


Рисунок 4 - Зависимость величины  $\sigma$  от параметра  $\Gamma$

При использовании степенного закона для описания зависимости коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса последние выражения позволяют сделать оценку погонных потерь напора во всасывающем трубопроводе [5 – 10]

$$i = i_{kp} \left( 1 + \frac{z-1}{k^{3-m}} \right) b k^{2-m}, \quad (23)$$

$$i_{kp} = \frac{Mv^m}{2gD^{1+m}} V_{kp}^{2-m}, \quad (24)$$

$$z = \left(1 + 150 \frac{d_{cp}}{D}\right) \frac{(1 + (\rho - 1)C)^{1,5}}{b}, \quad (25)$$

$$b = 1 + (\rho - 1)PC^2, \quad (26)$$

где  $i$  – погонные потери напора;  $i_{kp}$  – погонные потери напора в критическом режиме;  $P$  – содержание в техногенной россыпи частиц крупностью менее 100 мкм.

Результаты исследования зависимости погонных потерь напора от параметра гидротранспортирования на экстремумы указывают, что данная зависимость имеет минимум в точке

$$k_{\min} = 3^{-m} \sqrt{\frac{z-1}{2-m}}, \quad (27)$$

который реализуется в сверхкритических режимах течения при выполнении неравенства

$$\frac{(1 + (\rho - 1)C)^{1,5}}{1 + (\rho - 1)PC^2} > \theta, \quad (28)$$

$$\theta = \frac{3-m}{1 + 150 \frac{d_{cp}}{D}}. \quad (29)$$

Выражение в левой части последнего неравенства может быть представлено в следующем виде (рис. 5)

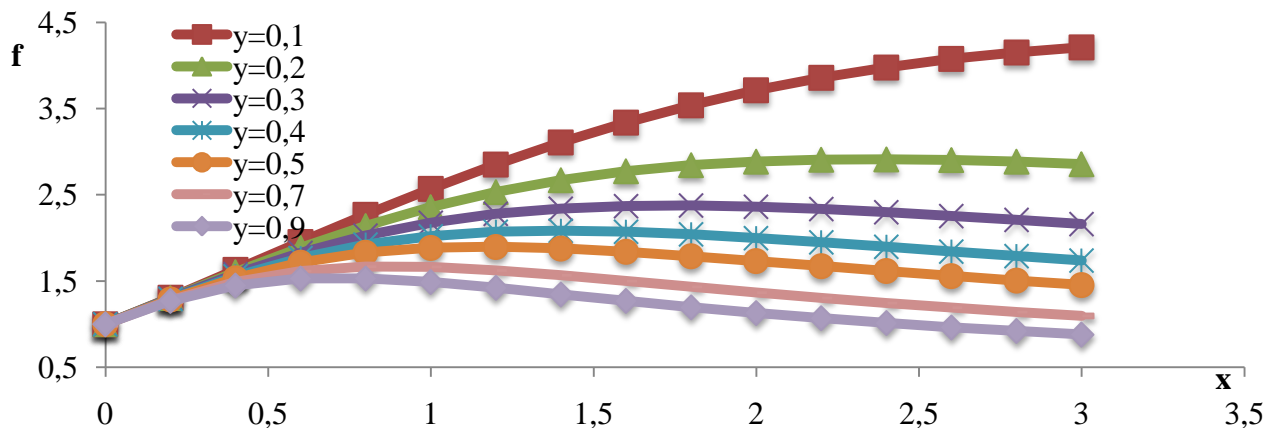
$$f(x, y) = \frac{(1+x)^{1,5}}{1+yx^2}, \quad (30)$$

$$x = (\rho - 1)C, \quad (31)$$

$$y = \frac{P}{\rho - 1}. \quad (32)$$

Из рис. 5 видно, что в рассматриваемой зависимости имеет место максимум, координаты которого определяются величинами  $P$  и  $\rho$ , что ограничивает величину концентрации гидросмеси следующими неравенствами:

$$\frac{3}{4\theta P} - \sqrt{\frac{9(\rho-1) - 16\theta(\theta-1)P}{16(\rho-1)\theta^2 P^2}} \leq C \leq \frac{3}{4\theta P} + \sqrt{\frac{9(\rho-1) - 16\theta(\theta-1)P}{16(\rho-1)\theta^2 P^2}}. \quad (33)$$

Рисунок 5 - Зависимость функции  $f$  от значений  $x$  и  $y$ 

При справедливости последнего ограничения на концентрацию гидросмеси и свойства частиц техногенной россыпи оптимальное значение параметра  $\Gamma$  будет определяться по формуле

$$\Gamma_* = \left( \frac{z-1}{2-m} \right)^{\frac{0,941}{3-m}} \Gamma_{кр}. \quad (34)$$

Использование полученного выражения для выбора и обоснования параметра технологии добычи позволяет минимизировать погонные потери напора, которые составляют значительную долю энергетических затрат для данной технологии.

**Выводы.** В результате совместного рассмотрения математической модели течения воды со взвешенными твердыми частицами в области между входом во всасывающий трубопровод и размываемым грунтом, зависимости параметра гидротранспортирования от свойств трубопровода и транспортируемого материала, а также известных формул для расчета размывающей скорости и выражений, описывающих зависимость геометрических параметров воронки всасывания от критической скорости гидротранспортирования во всасывающем трубопроводе, получена оценка погонных потерь напора при условии неразубоживания добываемой техногенной россыпи. Это позволило впервые обосновать параметры земснаряда и насосов для гидротранспорта техногенной россыпи добываемой подводным способом, а также сформулировать условие минимума энергоемкости рассматриваемой технологии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко, А.О. Наукове обґрунтування параметрів комплексів нового технічного рівня для гідро механізованого видобутку й переробки зернистих корисних копалин: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.05.06 /А.О. Бондаренко. – Дніпропетровськ, 2015. – 44 с.
2. Корнієнко, В.Я. Обґрунтування раціональних параметрів віброгідролічного інтенсифікатора для видобутку бурштину: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.06 /В.Я. Корнієнко. – Дніпропетровськ, 2011. – 23 с.
3. Христюк, А.О. Обґрунтування параметрів процесу гідромеханічного вилучення бурштину з піщаних покладів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.15.09 /А.О. Христюк. – Дніпропетровськ, 2017. – 21 с.

4. Франчук, В.П. Моделирование подводного забоя, образованного струйным грунтозаборным устройством / Ф.П. Франчук, А.А. Бондаренко // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, 2014. - №83. – С. 10 - 17.
5. Семененко, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей / Е.В. Семененко. – Киев: Наукова думка, 2011. – 232 с.
6. Семененко, Е.В. Проектировочный расчет трубопроводных систем технологий гидромеханизации при замене стальных труб полиэтиленовыми / Е.В. Семененко, Н.А. Никифорова, Л.Г. Татарко // механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины.– Днепропетровск, 2015. – Вып. 120.– С. 152–161.
7. Медведева, О.А. Определение размеров воронки всасывания для подводных технологий разработки россыпных месторождений / О.А. Медведева // Підводні технології: Міжн. наук.-вироб. журн. – 2016. – №3.– С. 47 – 53.
8. The main aspects of the durability increase of hydro-transportation pipeline systems providing exploitation reliability and efficiency / L. Makharadze, O. Lanchava, S.M. Radu, R.I. Moraru // Annals of the University of Petroșani, Mechanical Engineerin. – 2016. – vol. 18 (2016). – Pp. 99-102.
9. 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.
10. Семененко, Е.В. Оценка размеров воронки всасывания с учетом критической скорости гидро-транспортирования / Е.В. Семененко, О.А. Медведева, С.Н. Киричко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины.– Днепропетровск, 2016. – Вып. 129.– С. 152–161.

#### REFERENCES

1. Bondarenko, A.A. (2015), “Scientific substantiation for new engineering-level parameters of hydro-mechanized mining and processing of grained minerals”, Abstract of D. Sc. dissertation, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine.
2. Kornienko, V.Ya. (2011), “Substantiation of rational parameters of vibrohydraulic devices for amber extraction from amber deposits”, Abstract of Ph.D. dissertation, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine.
3. Khristyuk, A.O. (2017), “The parameters substantiation of amber extraction from sandy deposits by hydromechanical method”, Abstract of Ph.D. dissertation, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine.
4. Franchuk, V.P. and Bondarenko, A.A. (2014), “Simulation of an underwater face formed by a jet soil sampling device”, *Mining, construction, road and agricultural machines*, no. 83, pp. 10 – 17.
5. Semenenko, Ye.V. (2011), *Nauchnye osnovy tekhnologiy gidromekhanizatsii otkrytoy razrabotki titan-tsirkonovykh rossypey* [Scientific foundations of hydromechanization technologies for the open development of titanium-zircon placers], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
6. Semenenko, Ye.V., Nikiforova, N.A. and Tatarko, L.G. (2015), “Design calculation of pipeline systems of hydromechanization technologies when replacing steel pipes with polyethylene”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 120, pp. 152 -161.
7. Medvedeva, O.A. (2016), “Determining the size of the suction funnel for underwater technologies for the development of placer deposits”, *Underwater Technology*, no. 3, pp. 47 - 53.
8. Makharadze, L., Lanchava, O., Radu, S.M. and Moraru, R.I. (2016), “The main aspects of the durability increase of hydro-transportation pipeline systems providing exploitation reliability and efficiency”, *Annals of the University of Petroșani, Mechanical Engineerin*, vol. 18 (2016), pp. 99-102.
9. Loytsyanskiy, L.G. (1978), *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas], Nauka, Moscow, USSR.
10. Semenenko, Ye.V., Medvedeva, O.A. and Kirichko, S.N. (2016), “Estimating the dimensions of the suction funnel taking into account the critical speed of hydrotransportation”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 129, pp. 152 -161.

---

#### 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, [medvedevaolga1702@gmail.com](mailto:medvedevaolga1702@gmail.com).

**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, [medvedevaolga1702@gmail.com](mailto:medvedevaolga1702@gmail.com).

**Коваль Наталья Васильевна**, магистр, 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, [medvedevaolga1702@gmail.com](mailto:medvedevaolga1702@gmail.com).

#### About the authors

**Semenenko Yevgeniy 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, [medvedevaolga1702@gmail.com](mailto:medvedevaolga1702@gmail.com).

**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, [medvedevaolga1702@gmail.com](mailto:medvedevaolga1702@gmail.com).

**Koval Natalya Vasilievna**, Master of Sciences (M.Sc.), 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, [medvedevaolga1702@gmail.com](mailto:medvedevaolga1702@gmail.com).

**Анотація.** На сьогоднішній день застосування трубопровідного гідротранспорту є актуальним і перспективним напрямком розробки первинних і техногенних розсипів з-під шару води. У статті отримана оцінка погонних втрат напору за умови неразубожіння техногенного розсипу, який видобувається. В результаті проведених досліджень вперше обґрунтовані параметри земснаряду і насосів для гідротранспорту техногенного розсипу, який видобувається підводним способом, що дозволило сформулювати умови мінімуму енергоємності технології видобутку техногенних розсипів підводним способом. У роботі сформульовані умови запобігання разубожіння матеріалу, який видобувається при підводній розробці розсипних родовищ при роботі гідротранспортної установки в надкритичному режимі, що дозволить видобувати техногенні копалини, що формуються у сховищах відходів збагачення.

**Ключові слова:** воронка всмоктування, критичний режим течії, потужність техногенного розсипу.

**Abstract.** Today, use of pipeline hydrotransport is an actual and promising trend for the development of primary and technogeneus placers from under the water layer. In the article, head losses are estimated for the cases when the mined technogeneus placer is not diluted. As a result of the studies, parameters were first validated for the dredge and pumps in the hydrotransport used for mining technogeneus placers by the underwater method, hence making it possible to formulate a condition for obtaining minimum energy intensity for technology of underwater mining of technogeneus placers. In the article, the conditions are outlined for preventing dilution of the extracted material in the process of underwater mining of the alluvial deposits when the hydrotransport unit operates in the supercritical regime. This finding will allow mining the technogeneus deposits, which are formed in the tailing dumps with cleaning rejects .

**Key words:** suction funnel, critical flow regime, power of technogeneus placer.

Статья поступила в редакцию 18.02.2017

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