

ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРИ ПОДВОДНОЙ РАЗРАБОТКЕ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*Е.В. Семененко, О.А. Медведева, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова
НАН Украины*

Н.А. Никифорова, Национальная металлургическая академия Украины

Установлена 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. Сформулированы условия предотвращения разубоживания добываемого материала при подводной разработке россыпных месторождений.

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 параметра гидротранспортирования до настоящего времени не изучена [6 – 11]. 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 [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.

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]:

$$R(\theta) = \frac{2D\zeta}{\sqrt[4]{\sin \theta}}, \quad R_D = \frac{D\zeta^{4/3}}{0,315}, \quad R_0 = \zeta \frac{D}{2}, \quad \theta_D = \arcsin \left[\left(\frac{0,25}{\zeta} \right)^{4/3} \right], \quad W = \frac{64\pi}{3} D^3 \Omega(\zeta),$$
$$T_w = \frac{D}{w} \frac{\varepsilon(\sigma)}{0,609}, \quad \Omega(\zeta) = \zeta \left(1 + \frac{3}{64} \sqrt[3]{\frac{\zeta}{2}} \right), \quad \varepsilon(\sigma) = \frac{52}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma}{52}} \right)^2,$$
$$\zeta = 1,07 \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma}{52}} \right)^2, \quad \sigma = \frac{4Q}{\pi D^2 w},$$

где θ – 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; θ_D – угловая координата, соответствующая проекции внешней стороны трубопровода на дно воронки всасывания (рис. 1); ζ – коэффициент, учитывающий условия всасывания; σ – 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.

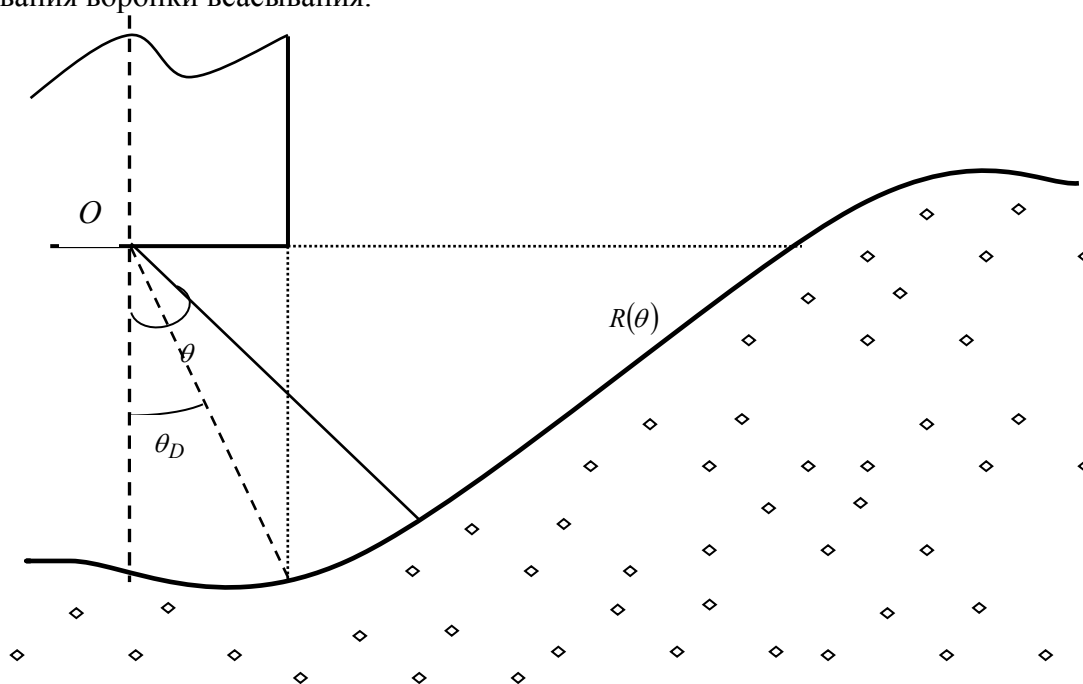


Рисунок 1 – Схема течения в воронке всасывания грунтозаборного устройства [14]

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

$$\sigma = k\sigma_{kp}, \quad \sigma_{kp} = \frac{V_{kp}}{w}, \quad k = \frac{V}{V_{kp}},$$

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

Представление величины σ в предлагаемом виде позволяет 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.

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):

$$\frac{R}{D} = \frac{7,663}{\sqrt[4]{\sin \theta}} \sigma^{0,7054}, \quad \frac{R_D}{D} = \frac{\sigma^{0,9406}}{0,053}, \quad \frac{R_0}{D} = \frac{\sigma^{0,7054}}{0,522}, \quad \theta_D = \frac{1,5062}{\sigma^{0,9406}}, \quad \frac{W}{D^3} = \frac{\sigma^{0,7255}}{0,0037}, \quad \frac{T_W V_{kp}}{D} = \frac{305,7 \sigma_{kp}}{\sigma^{0,2946}}.$$

При $k=1$ во всасывающем и напорном трубопроводах наступает критический 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 значения k , будут максимально возможными для рассматриваемых условий.

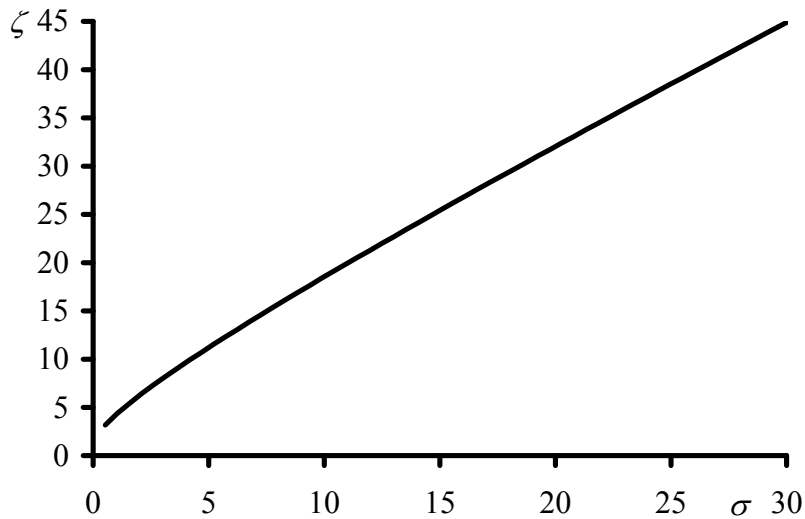


Рисунок 2 – Зависимость величины ζ от параметра всасывания

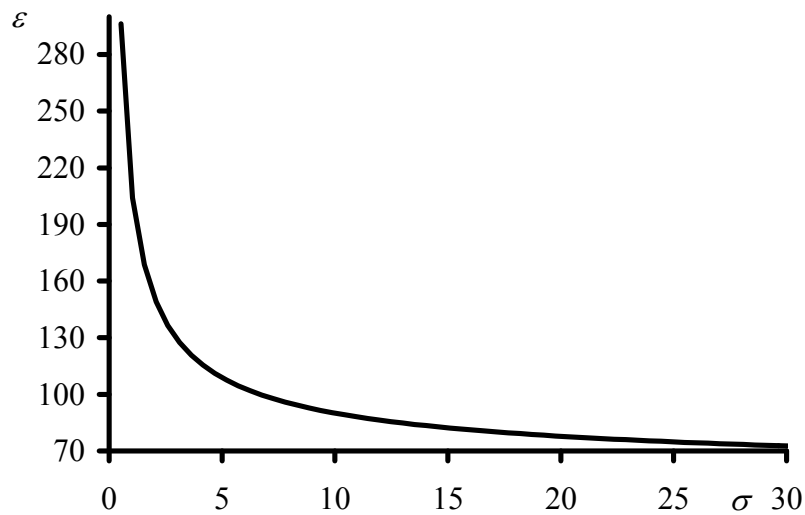


Рисунок 3 – Зависимость величины ε от параметра всасывания

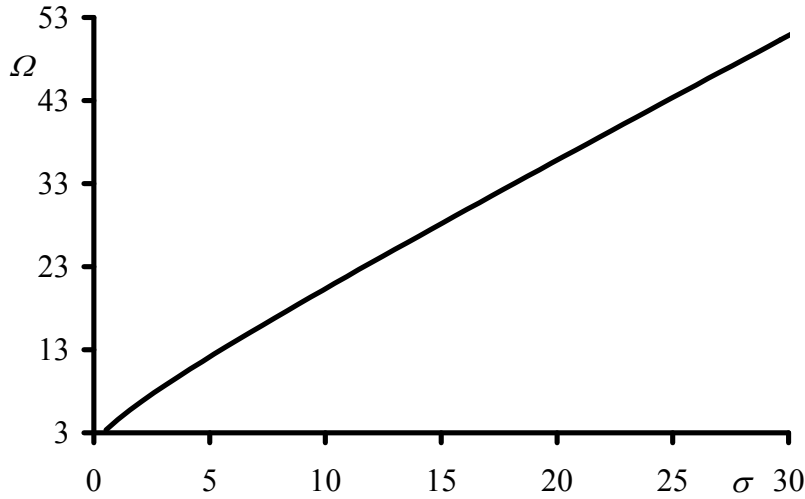


Рисунок 4 – Зависимость величины Ω от параметра всасывания

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 воронки всасывания будут ограничиваться такими двойными неравенствами:

$$\frac{7,663}{\sqrt[4]{\sin \theta}} \sigma_{kp}^{0,7054} \leq \frac{R}{D} \leq \frac{16,633}{\sqrt[4]{\sin \theta}} \sigma_{kp}^{0,7054}, \quad \frac{\sigma_{kp}^{0,9406}}{0,053} \leq \frac{R_D}{D} \leq \frac{\sigma_{kp}^{0,9406}}{0,019}, \quad \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,522} \leq \frac{R_0}{D} \leq \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,254},$$

$$\frac{0,536}{\sigma_{kp}^{0,9406}} \leq \theta_D \leq \frac{1,506}{\sigma_{kp}^{0,9406}}, \quad \frac{\sigma_{kp}^{0,7255}}{0,0037} \leq \frac{W}{D^3} \leq \frac{\sigma_{kp}^{0,7255}}{0,0017}, \quad \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,0046} \leq \frac{T_W V_{kp}}{D} \leq \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,0033}.$$

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

$$\frac{\Delta R}{D} = \frac{8,97}{\sqrt[4]{\sin \theta}} \sigma_{kp}^{0,7054}, \quad \frac{\Delta R_D}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,9406}}{0,029}, \quad \frac{\Delta R_0}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,472},$$

$$\Delta \theta_D = \frac{0,97}{\sigma_{kp}^{0,9406}}, \quad \frac{\Delta W}{D^3} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7255}}{0,003}, \quad \frac{\Delta T_W V_{kp}}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,012},$$

так и их средние значения

$$\frac{\tilde{R}}{D} = \frac{4,33}{\sqrt[4]{\sin \theta}} \sigma_{kp}^{0,7054}, \quad \frac{\tilde{R}_D}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,9406}}{0,101}, \quad \frac{\tilde{R}_0}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,711},$$

$$\tilde{\theta}_D = \frac{1,253}{\sigma_{kp}^{0,9406}}, \quad \frac{\tilde{W}}{D^3} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7255}}{0,007}, \quad \frac{\tilde{T}_W V_{kp}}{D} = \frac{\sigma_{kp}^{0,7054}}{0,0066}.$$

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. Зависимость величины σ_{kp} от параметров трубопровода и транспортируемого материала можно выразить, используя для определения критической скорости зависимости, предложенные А.П. Юфиным [7] и сотрудниками ИГМ НАН Украины, обобщенные специалистами ИГТМ НАН Украины [8 – 11], а для определения размывающей скорости – результаты Дюбуа, М.А. Великанова, В.Н. Гончарова, Д.В. Розшупкина [12], обобщенные А.А. Бондаренко [5]:

$$\sigma_{kp} = \frac{10,1}{A} \sqrt[3]{\frac{Gm}{\delta}} \sqrt[4]{\psi} \frac{\rho(0,6 + 0,4C) - 0,4C}{(1-C)\rho + C},$$

$$\delta = \frac{\Delta}{D}, \quad Gm = \frac{v}{\sqrt{gd_{cp}^3}}, \quad \psi = \frac{u_{cp}}{\sqrt{gd_{cp}}} \left(\frac{3d_{10}}{d_{90}} \right)^{0,4}, \quad A = \sqrt{14 + \frac{5}{d_{cp}^2}},$$

где C – массовая доля твердого в пульпе; ρ – относительная плотность транспортируемого материала; Δ – 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.

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. Этот процесс происходит в случае, если глубина воронки всасывания превышает мощность пласта россыпи

$$R_D > H,$$

где H – мощность россыпи.

Рассматривая это условие совместно с полученными зависимостями для интервалов изменения геометрических параметров воронки всасывания, можно сформулировать ограничение на величину σ_{kp} , соблюдение которого обеспечит предотвращение разубоживания добываемого материала,

$$\sigma_{kp} \leq 0,015 \left(\frac{H}{D} \right)^{1,063},$$

которое с учетом полученного выражения для расчета минимально возможного значения параметра всасывания позволяет сформулировать ограничения на диаметр трубопровода

$$D \leq D_H, \quad D_H = \chi D_*,$$

$$D_* = \frac{H^{0,762}}{\psi^{0,179}} A^{0,716} \left(\frac{\Delta}{Gm} \right)^{0,239}, \quad \chi = 0,009 \left(\frac{(1-C)\rho + C}{\rho(0,6 + 0,4C) - 0,4C} \right)^{0,716},$$

или на концентрацию гидросмеси

$$C \leq P, \quad P = \frac{B - 0,6}{B + 0,4} \frac{\rho}{\rho - 1}, \quad B = 0,0015 \frac{A}{\sqrt[4]{\psi}} \sqrt[3]{\frac{\delta}{Gm}} \left(\frac{H}{D} \right)^{1,063},$$

где D_H – критическое для данной мощности россыпи значение диаметра трубопровода; χ – коэффициент, учитывающий влияние плотности и концентрации россыпи на критический

диаметр (рис. 5); P – предельно допустимая из условия предотвращения разубоживания добываемой россыпи концентрация гидросмеси (рис. 6).

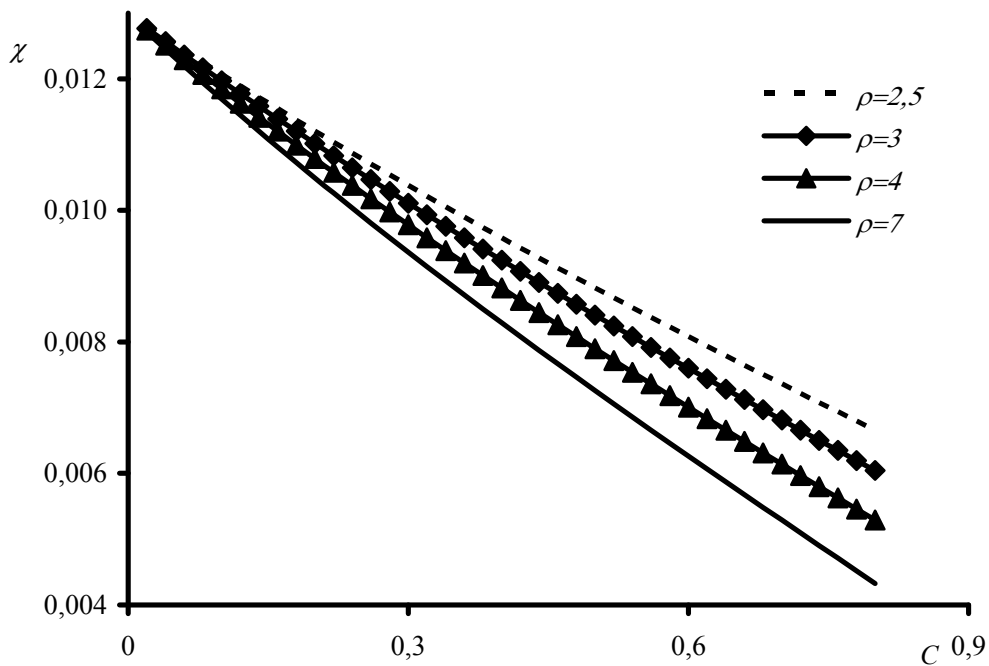


Рисунок 5 – Зависимость величины χ от концентрации гидросмеси при различной относительной плотности россыпи

Из рис. 5 видно, что значение коэффициента χ слабо зависит от плотности россыпи, и, как показывают результаты численных исследований, при проведении расчетов с инженерной точностью этой зависимостью можно пренебречь, используя следующую аппроксимацию: $\chi = 0,0127 - 0,0095C$

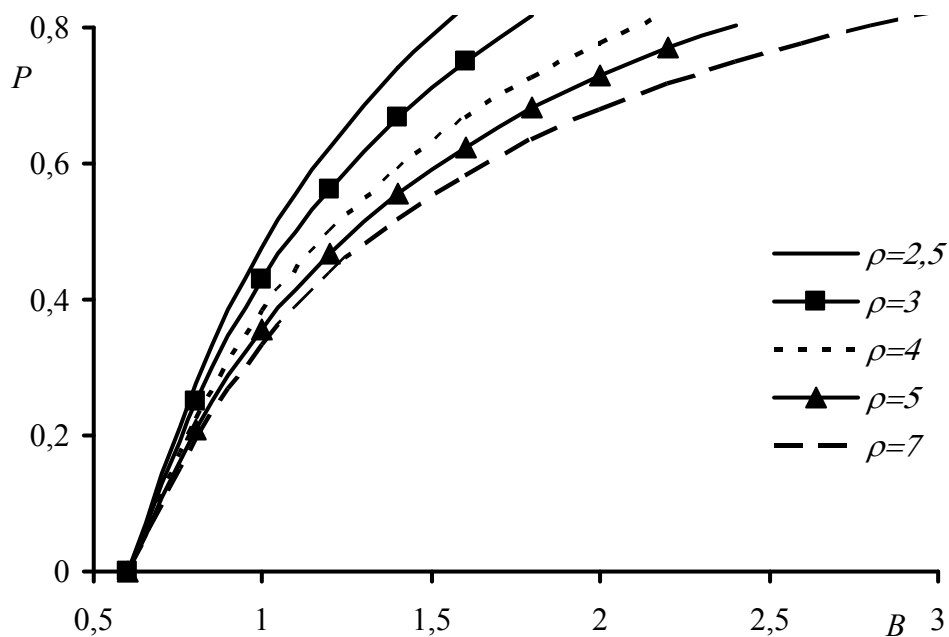


Рисунок 6 – Зависимость величины P от параметра B при различной относительной плотности россыпи

Анализ формулы для расчета предельно допустимой концентрации гидросмеси P позволяет оценить интервал изменения величины B в следующем виде:

$$0,6 \leq B \leq b, \quad b = \frac{0,6\rho + 0,4(\rho - 1)C_*}{\rho - (\rho - 1)C_*},$$

где b – максимально допустимое значение величины B (рис. 7); C_* – предельно возможная для данной россыпи массовая доля твердого в пульпе.

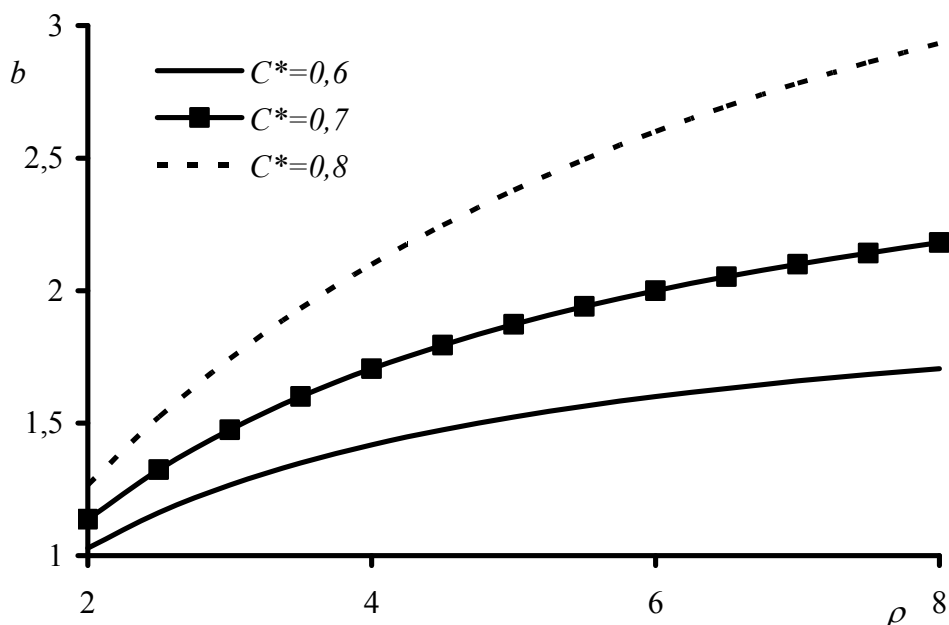


Рисунок 7 – Зависимость b от относительной плотности россыпи при различных значениях предельно возможной массовой доли твердого в пульпе

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 и сформулировать условия, предотвращающие разубоживание добываемой россыпи.

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., Бондаренко, А.А., 2014. Моделирование подводного забоя, образованного струйным грунтозаборным устройством. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, №83, 10 - 17.
6. Семененко, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титанцирконовых россыпей / Евгений Владимирович 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: Наук. 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.: Наук. думка, 1976. – 156 с.
11. Коберник С.Г. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов / С.Г. Коберник, В.И. Войтенко. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.
12. Великанов, М.А. Руслевой процесс / М.А. Великанов. – М.: Гостехиздат, 1958.
13. Семенов Е.В. Проектировочный расчет трубопроводных систем технологий гидромеханизации при замене стальных труб полиэтиленовыми / Е.В. Семенов, 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 // Підводні технології: Міжн. наук.-вироб. журн. / КНУБА. – Київ, – №3. – 2016. – С. 47 – 53.
15. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Лев Герасимович Лойцянский. – [5-е изд., перераб.]. – М.: Глав. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1978. – 736 с.

УДК 539.4.012

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ УСИЛИЙ В КРЕПЛЕНИЯХ ПРИВОДНЫХ УЗЛОВ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ

В.Д. Кирнос, Государственное ВУЗ «Национальный горный университет», Украина

Рассмотрены условия нагружения креплений приводных узлов барабанных мельниц. Установлены зависимости максимальных усилий креплений приводных узлов от их конструктивных параметров.

Вступление. Измельчение добытых руд, как подготовка к обогащению, обусловлено применением барабанных рудоразмольных мельниц. Общая тенденция к увеличению добычи и переработки руд выражается в повышении производительности технологического оборудования, а следовательно, укрупнении его мощности. Увеличение еденичной мощности технологических агрегатов привело к увеличению габаритных размеров и веса установленного оборудования. С появлением крупных мельниц увеличилась нагруженность их узлов и деталей при заметном снижении запаса прочности и долговечности. Все это представляет повышенные требования при определении рациональных параметров узлов и деталей мельниц. Подавляющее большинство барабанных мельниц имеют безредукторные привода, оборудованные открытыми зубчатыми передачами. В целом рудоразмольная мельница представляет собой сложный электромеханический агрегат, установленный на фундаменте. Приводные узлы существующих барабанных мельниц являются конструктивно подобными друг другу и каждый состоит из трех основных элементов: шестерни, связанной с электродвигателем; корпуса подшипников и фундаментной плиты. Шестерня через подшипники и крышки подшипников посредством резьбовых соединений связана с корпусом подшипников. Корпус в свою очередь крепится к фундаментной плите болтовыми соединениями. Весь приводной узел установлен на фундаменте и связан с ним анкерными болтами.

Рудоразмольные мельницы, эксплуатируемые на предприятиях, как правило, изготавливаются в неререверсивном исполнении. Направление вращения привода выбрано таким образом, что нормальное усилие, возникающее в зацеплении открытой зубчатой