

Определение размеров воронки всасывания для подводных технологий разработки россыпных месторождений

Ольга Медведева

Институт геотехнической механики имени Н.С. Полякова НАН Украины
ул. Симферопольская, 2-А, Днепропетровск, Украина, 49005
Olya-1702@yandex.ua, orcid.org/0000-0001-5575-713X

Аннотация. Установлено, что применение трубопроводного гидротранспорта считается наиболее перспективным для разработки первичных и техногенных россыпей из под слоя воды. Проанализированы теоретические исследования процессов течения в рассматриваемой области, однако даже они существенно опираются на экспериментальные константы и используют не обоснованные предположения. Получены теоретические оценки размеров воронки всасывания, учитывающие производительность установки, диаметр всасывающего трубопровода, а также свойств твердых частиц добываемой россыпи. Рассматривая гидросмесь как однородную жидкость повышенной плотности, научно обоснована модель течения в зоне всасывания грунтозаборного устройства. Полученные зависимости позволяют обосновать периодичность и шаг перемещения добычной установки, а также оценить время разработки месторождения и рациональное количество установок.

Ключевые слова: воронка всасывания, радиус размыва, грунтозаборное устройство.

ВВЕДЕНИЕ

Применение трубопроводного гидротранспорта считается наиболее перспективным для разработки первичных и техногенных россыпей из под слоя воды [1 – 5]. Независимо от того используется для добычи россыпей земснаряд или эрлифтная установка процесс поступления взвешенно-

го или размываемого грунта во всасывающий трубопровод во многом определяет эффективность всей технологии. Кроме этого параметры технологии добычи существенно зависят от геометрических размеров воронки всасывания, которая образуется при взаимодействии потока жидкости, засасываемого в трубопровод, и грунтом, находящимся возле трубы. Результаты анализа известных методов расчета параметров воронок, образуемых на входе во всасывающий трубопровод земснаряда [1 – 5], указывают на доминирование в них эмпирических зависимостей, или формул, полученных на основе теории размерности. Известны немногочисленные теоретические исследования процессов течения в рассматриваемой области, а также единичные попытки построения математической модели процесса [5, 6]. Однако даже они существенно опираются на экспериментальные константы и используют не обоснованные предположения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью публикации является разработать математическую модель течения воды со взвешенными твердыми частицами в области между входом во всасывающий трубопровод и размываемым грунтом, а затем

на основании этого определить геометрические размеры воронки всасывания теоретическим путем.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ

На основе результатов визуализации течения возле входа во всасывающий трубопровод земснаряда [1 – 5], а также известных положений [7, 8 – 11] и гипотез технической гидродинамики [12 – 16], предлагается следующая расчетная схема рассматриваемого течения (Рис. 1):

- течение является осесимметричным и при рассмотрении в сферической системе координат параметры течения зависят от радиуса и одной угловой координаты;

- угловая координата в рассматриваемых условиях изменится от 0, что соответствует срезу всасывающего трубопровода, до 90°, что соответствует максимальной глубине воронки всасывания;

- в поперечном сечении рассматриваемой области каждый из краев трубопровода является центром потенциального вихря, определяющих распределение угловых скоростей жидкости;

- радиальная координата изменяется от нуля, расположенного в углу всасывающего трубопровода, и до границы воронки всасывания;

- движение жидкости описывается системой уравнений Эйлера;

- частицы твердой фракции полностью увлекаются жидкостью, то есть гидросмесь рассматривается как однородная жидкость повышенной плотности.

Уравнение Эйлера в сферической системе координат для рассматриваемого объема, а также соответствующие граничные условия, преобразуются к следующему виду [5, 16, 17]:

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} = \frac{u^2}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \tag{1}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} = -\frac{uv}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{r \partial \theta}, \tag{2}$$

$$\frac{2u}{r} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} = \frac{u^2}{r} - \text{ctg}\theta \frac{v}{r}, \tag{3}$$

$$u(r) = u, \quad u(R) = \omega, \tag{4}$$

где u – радиальная составляющая скорости гидросмеси; v – угловая составляющая.

Уравнение Эйлера в сферической системе координат для рассматриваемого объема, а также соответствующие граничные условия, преобразуются к следующему виду [5, 16, 17]:

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} = \frac{u^2}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \tag{1}$$

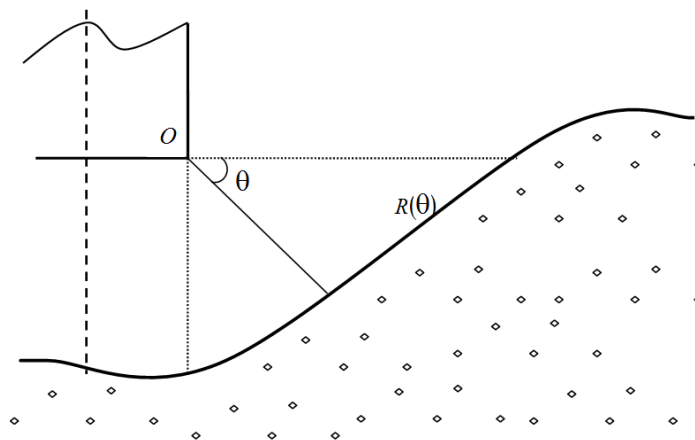


Рис. 1. Схема течения в воронке всасывания грунтозаборного устройства
Fig. 1. Scheme of flow in a suction funnel suction head

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} = -\frac{uv}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{r \partial \theta}, \quad (2)$$

$$\frac{2u}{r} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} = \frac{u^2}{r} - \text{ctg}\theta \frac{v}{r}, \quad (3)$$

$$u(r) = u, \quad u(R) = \omega, \quad (4)$$

где u – радиальная составляющая скорости гидросмеси; v – угловая составляющая скорости гидросмеси; p – давление потока гидросмеси; ρ – плотность всасываемой среды; θ – текущая угловая координата; r – текущее значение радиуса; ω – радиальная проекция размывающей скорости [1 – 5]; R – радиус воронки всасывания.

В соответствии с моделью «потенциального вихря», угловая составляющая скорости гидросмеси будет обратно пропорциональна радиусу рассматриваемого сечения [16, 17]:

$$v = w \frac{R}{r}, \quad (5)$$

где w – угловая проекция размывающей скорости.

С использованием формулы (5) нетрудно получить выражения для соответствующих производных от угловой составляющей скорости потока и переписать уравнения (1) – (3) в следующем виде:

$$\frac{w^2}{r^3} R \frac{\partial R}{\partial \theta} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \theta}, \quad (6)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{w^2 R^2}{r^3} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \theta} = -R \text{ctg}\theta - \frac{2ru}{w} - \frac{r^2}{w} \frac{\partial u}{\partial r}. \quad (8)$$

Учитывая геометрические размеры зоны всасывания [1 – 5], предположим, что изменением давления в радиальном направлении можно пренебречь по сравнению с центробежными силами. С учетом этого

уравнение (7) преобразуется к виду, позволяющему разделить переменные и получить выражение для расчета радиальной составляющей скорости:

$$u = w \sqrt{1 - \left(\frac{R}{r}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{w}\right)^2}, \quad (9)$$

Формула (9) позволяет получить выражение для производной от радиальной скорости по радиусу и преобразовать уравнение (8) к виду, допускающему разделение переменных и получению следующего решения:

$$R = C \left| \frac{\sin k\theta}{\sin \theta} \text{tg} k\theta \right|, \quad (10)$$

где C – константа интегрирования; ψ – угол между поверхностью воронки всасывания и вертикалью; k – коэффициент формы воронки, учитывающий отличие формы поверхности воронки всасывания от сферической.

Для определения величины константы интегрирования определим расход через единичное радиальное сечение воронки всасывания:

$$\frac{Q}{\pi D} = w R \ln \left(\frac{2R}{D} \right). \quad (11)$$

После подстановки выражения (10) в формулу (11) для определения величины константы интегрирования получим следующее нелинейное уравнение

$$q = x \ln(x), \quad (12)$$

$$q = \frac{Q}{\pi D^2 w}, \quad (13)$$

$$x = \frac{2C}{D} \left| \sin \frac{k\pi}{2} \text{tg} \frac{k\pi}{2} \right|, \quad (14)$$

где q – безразмерный расход.

Уравнение (12) существенно не линейно и имеет единственное решение, существующее в промежутке $1 < x < e^q$, поиск которого возможен только численными методами, при этом зависимость величины искомого корня от безразмерного расхода в квадратичных координатах с инженерной точностью может быть аппроксимирована линейной функцией (Рис. 2).

Это позволяет получить аналитическое выражение для определения константы интегрирования и записать формулу (10) в таком виде:

$$R = 1,07 \frac{D}{2} \Gamma \left(1 + \frac{\sqrt{q}}{2,54} \right)^2, \quad (15)$$

$$\Gamma = \frac{\left| \frac{\sin k\theta}{\sin \theta} \operatorname{tg} k\theta \right|}{\left| \sin \frac{k\pi}{2} \operatorname{tg} \frac{k\pi}{2} \right|}, \quad (16)$$

где Γ – параметр формы воронки всасывания (Рис. 3).

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ВОРОНКИ ВСАСЫВАНИЯ

Результаты численного анализа формулы (16) и зависимости Рис. 3, указывают на возможность ее аппроксимации экспоненциальной функцией.

С учетом этого зависимость радиуса воронки всасывания от текущего угла, характеристики трубопровода и параметров процесса добычи, будет описываться следующим выражением:

$$R = \frac{D}{2} \left(1 + \frac{\sqrt{q}}{2,54} \right)^2 \frac{1 - 0,96k}{3,16B} e^{B\theta}, \quad (17)$$

$$B = 7,33 - 14,34k + 9,99k^2. \quad (18)$$

Формулы (17) и (18) позволяют определить максимальную глубину воронки всасывания, которая будет под поперечным сечением всасывающего трубопровода, и максимальный диаметр воронки всасывания, который рассчитывается по ее краю на поверхности разрабатываемой россыпи:

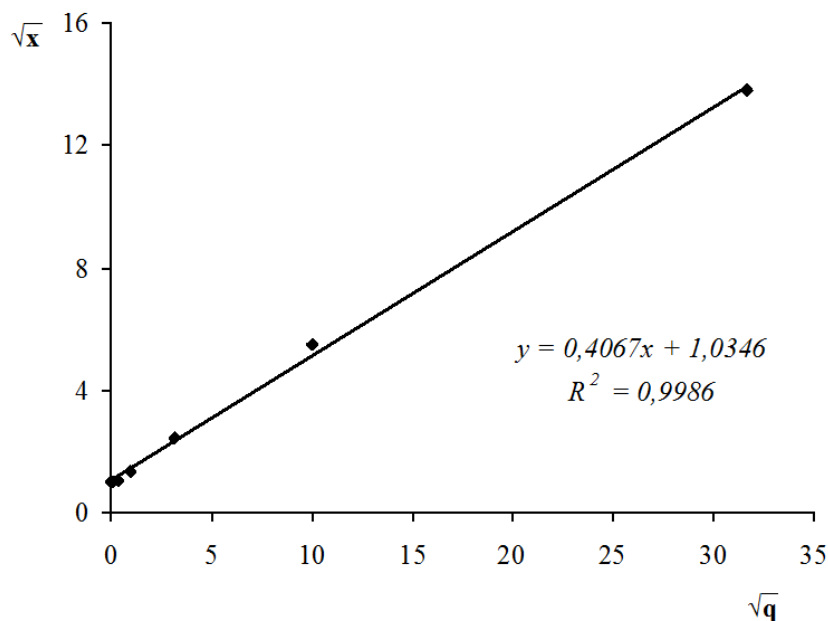


Рис 2. Зависимость корня уравнения (12) от безразмерного расхода в квадратичных координатах

Fig. 2. The dependence of the root of the equation (12) on the dimensionless flow in quadratic coordinates

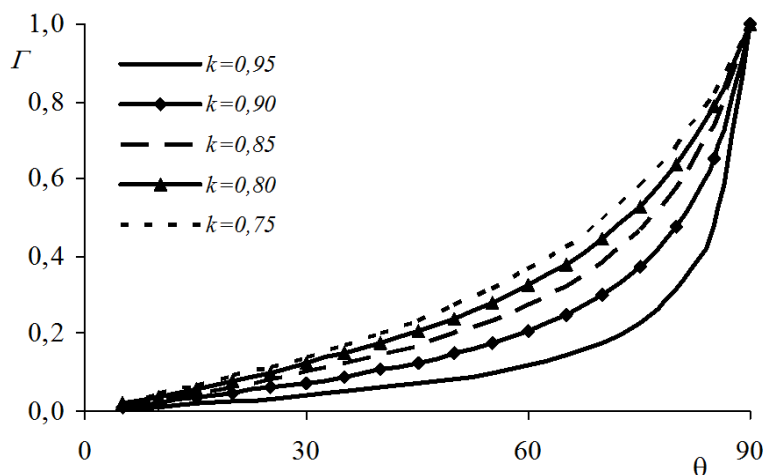


Рис. 3. Зависимость параметра формы воронки всасывания от текущего угла при разных значениях коэффициента формы воронки
Fig. 3. The dependence of the shape parameter suction hopper from the current angle for different values of the coefficient of the funnel shape

$$\frac{H_0}{D} = 0,15 \left(1 - \frac{k}{1,02} \right) \left(1 + \frac{0,394}{D} \sqrt{\frac{Q}{\pi w}} \right)^2, \quad (19)$$

$$\frac{D_0}{D} = 1 + 1,76 \left(1 - \frac{k}{1,19} \right) \left(1 + \frac{0,394}{D} \sqrt{\frac{Q}{\pi w}} \right)^2, \quad (20)$$

где H_0 – максимальная глубина воронки всасывания; D_0 – максимальный диаметр воронки всасывания.

ВЫВОДЫ

Таким образом, с использованием полученных формул становится возможным определить ожидаемые радиус и глубину воронки всасывания в зависимости от производительности установки, диаметра всасывающего трубопровода, а также свойств твердых частиц добываемой россыпи. Это позволяет обосновать периодичность и шаг перемещения добычной установки, а также оценить время разработки месторождения и рациональное количество установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нурок Г.А., 1959.** Гидромеханизация горных работ. Москва, Госгортехиздат, 391.
2. **Нурок Г.А., 1985.** Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ. Москва, Недра, 583.
3. **Нурок Г.А., 1970.** Гидромеханизация открытых разработок. Москва, Недра, 584.
4. **Нурок Г.А., 1965.** Технология и проектирование гидромеханизации горных работ. Москва, Недра, 210.
5. **Франчук В.П., Бондаренко А.А., 2015.** Моделирование подводного забоя, образованного струйным грунтозаборным устройством. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, Вип.83, 10-17.
6. **Семененко Е.В., 2011.** Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых. Киев, Наукова думка, 232.
7. **Юфин А.П., 1965.** Гидромеханизация. Москва, Стройиздат, 496.
8. **Михайлов К.А., 1950.** Гидравлика, гидрология, гидрометрия. Часть I. Москва, ДОРИЗДАТ, 288.
9. **Альтшуль А.Д., 1982.** Гидравлические сопротивления. Москва, Недра, 224.
10. **Курганов А.М., Федоров Н.Ф., 1973.** Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации.

- Ленинград, Стройиздат, 408.
11. **Криль С.И., 1990.** Напорные взвешенные потоки. Киев, Наукова думка, 170.
 12. **Блюсс Б.А., Головач Н.А., 1999.** Совершенствование технологий предобогащения ильменитовых руд. Днепропетровск, Полиграфист, 126.
 13. **Великанов М.А., 1958.** Руслевой процесс. Москва, Гостехиздат, 204.
 14. **Маккаев Н.И., Чалов Р.С., 1986.** Руслевые процессы. Москва, Изд-во МГУ, 264.
 15. **Маккаев В.М., 1931.** К теории турбулентного режима взвешивания наносов. Изв. ГПИ, Вып.32, 17-23.
 16. **Медведева О.А., 2012.** Хвостохранилища Кривбасса, проблемы и особенности их эксплуатации. Днепропетровск, Геотехническая механика, Вып.103, 279-285
 17. **Франчук В., Бондаренко А., 2015.** Математическая модель движения несущего потока в классификаторе гидравлическом горизонтальном горизонтальном. Підводні технології, Вип.02, 24-32.
 10. **Kurganov A.M., Fedorov N.F., 1973.** Spravochnik po gidravlicheskim raschetam sistem vodosnabzhenija i kanalizacii. Leningrad, Gostekhizdat, 408 (in Russian).
 11. **Kril' S.I., 1990. A.D., 1954.** Napornye vzvshenesushhie potoki. Kiev, Naukova dumka, 170 (in Russian).
 12. **Bljuss B.A., Golovach N.A., 1999.** Sovershenstvovanie tehnologij predobogashhenija il'menitovyh rud. Dnepropetrovsk, Poligrafist, 126 (in Russian).
 13. **Velikanov A.D., 1958.** Ruslovoj process. Gostekhizdat, Moscow, 204 (in Russian).
 14. **Makkaveev N.I., Chalov R.S., 1986.** Ruslovyje processy. Moscow, MGU, 264 (in Russian).
 15. **Makkaveev V.M., 1931.** K teorii turbulentnogo rezhima vzveshivaniya nanosov. Izvestiya GPI, 17-23 (in Russian).
 16. **Medvedeva O.A., 2012.** Hvostohranilishha Krivbassa, problemy i osobennosti ih jekspluatacii. Dnepropetrovsk, Geotekhnicheskaya Mekhanika, Vol.103, 279-285 (in Russian).
 17. **Franchuk V., Bondarenko, A., 2015.** Matematycheskaja model' dvyzhenija nesushhego potoka v klassyfykatore gydravlycheskom goryzontal'nom goryzontal'nom., Underwater technologies, Vol.02, 24-32 (in Ukrainian).

REFERENCES

1. **Nurok G.A., 1959.** Gidromehanizacija gomyh robot. Moscow, Gosgortekhizdat, 391 (in Russian).
2. **Nurok G.A., 1985.** Processy i tehnologii gidromehanizacii otkrytyh gomyh robot. Moscow, Nedra, 583 (in Russian).
3. **Nurok, G.A., 1970.** Gidromekhanizatsyya otkrytykh razrabotjk. Moscow, Nedra, 584 (in Russian).
4. **Nurok G.A., 1959.** Tehnologija i proektirovanie gidromehanizacii gomyh robot. Moscow, Nedra, 210 (in Russian).
5. **Franchuk V.P., Bondarenko, A.A., 2015.** Modelirovanye podvodnogo zaboja, obrazovannogo strujnym gruntozabornym ustrojstvom., Mining, construction, road and agricultural machines, Vol.83, 10-17 (in Ukrainian).
6. **Semenenko E.V., 2011.** Nauchnye osnovy tehnologij gidromehanizacii otkrytoj razrabotki titan-cirkonovyh. Kiev, Naukova dumka, 232 (in Russian).
7. **Yufin A.P., 1965.** Gidromehanizacija. Moscow, Gosstroyizdat, 496 (in Russian).
8. **Mikhaylov K.A., 1950.** Gidravlika, gidrologija, gidrometrija. Part 1, Moscow, DORIZDAT, 288 (in Russian).
9. **Al'tshul' A.D., 1982.** Gidravlicheskie

Determining the size of the suction funnel for underwater placer mining technology

Olga Medvedeva

Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine, Street Simferopol'skaya, 2A, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49005
 Olya-1702@yandex.ua
 orcid.org/0000-0001-5575-713X

Summary. The studies found that the use of hydraulic transport pipeline is considered to be the most promising for the development of primary and secondary industrial placers from the water layer. The theoretical study of flow processes in the area under consideration, even though they are essentially based on the experimental constants and used unjustified assumptions. The paper presents

theoretical estimates of the size of the suction funnel. They first take into account the productivity of the plant, the diameter of the suction pipe, as well as the properties of the solid particles produced placer. The paper is considered as homogeneous slurry of higher density liquid. The article scientifically based model of the flow in the intake area of the dredge device. These

dependencies allow to justify the frequency and step movement of the mining installation, as well as to estimate the time of field development and management of the number of installations.

Key words: suction funnel, erosion radius, soil-device.