

УДК 001.891.54

DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-4-32-38

## ОСОБЕННОСТИ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗМЫВА ГОРНЫХ ПОРОД НАПОРНОЙ СТРУЕЙ ГИДРОМОНИТОРА

### PECULIARITIES OF JUSTIFICATION OF THE MODEL PARAMETERS OF JETTING JET EROSION OF ROCKS



*Н. А. Шкаруба,*  
Сибирский федеральный  
университет,  
г. Красноярск  
*nshkaruba@sfu-kras.ru*



*В. Е. Кисляков,*  
Сибирский федеральный  
университет,  
г. Красноярск  
*VKislyakov@sfu-kras.ru*



*Ф. И. Борисов,*  
Сибирский федеральный  
университет,  
г. Красноярск

*N. Shkaruba,*  
Siberian Federal  
University, Krasnoyarsk

*V. Kislyakov,*  
Siberian Federal University,  
Krasnoyarsk

*F. Borisov,*  
Siberian Federal University,  
Krasnoyarsk

Отмечено, что в Красноярском крае сосредоточено большое количество россыпных месторождений, вмещающие породы которых представляют собой глинистый массив. Из таких месторождений добывают наиболее ценные ископаемые, такие как россыпное золото и уголь. Указано, что для отработки таких месторождений в указанных условиях целесообразно применение гидромониторной отбойки. Так как на горнодобывающих предприятиях используется оборотное водоснабжение из прудов-отстойников, при размыве глинистого массива в напорной воде накапливаются взвешенные тонкодисперсные грунтовые частицы, из-за наличия которых применение закона изменения количества движения И. Ньютона в расчетах становится невозможным и для установления зависимостей необходимы экспериментальные данные. Показаны особенности обоснования параметров модели (лабораторной установки) для исследования интенсивности размыва горных пород напорной струей гидромонитора. Рассчитаны критерии подобия, спроектирован лабораторный стенд в масштабе 1 : 10, благодаря чему можно с достаточной достоверностью проводить исследования гидромониторной отбойки в широком диапазоне изменяемых условий, выявить их влияние и определить сочетание указанных факторов, позволяющее повысить эффективность добычи полезного ископаемого.

**Ключевые слова:** россыпное месторождение; модель; гидромонитор; моделирование процессов; струя гидромонитора; лабораторная установка; плотность воды; критерии подобия; масштаб моделирования; интенсивность отбойки; эффективность

In the Krasnoyarsk Region, a large number of alluvial deposits are concentrated, the host rocks of which are a clay massif. Of these deposits, the most important minerals, such as alluvial gold and coal, are mined. The most expedient for the development of such deposits under the specified conditions is the use of a jetting. Since the mining enterprises use recycled water supply from settling ponds, when the clay massif is washed away in the pressurized water, suspended fine-grained ground particles accumulate, because of the presence of which the application of the law of changing the momentum of I. Newton's calculations becomes impossible and for estab-

lishing the dependencies experimental data. This article shows the features of the parameters justification of the model (laboratory installation) for studying the intensity of rocks' erosion by a pressure jet of a hydro-monitor; the similarity criteria were designed for a laboratory stand at a scale of 1 : 10, which allows to carry out, with sufficient certainty, studies of jetting in a wide range of variable conditions, influence and determine a combination of these factors, which makes it possible to increase the efficiency of mining of mineral resources

**Key words:** placer deposit; model; hydromonitor; process simulation; jet stream; laboratory installation; water density; similarity criteria; scale of modeling; intensity of breaking; efficiency

**Введение.** В Красноярском крае со средоточено значительное количество месторождений золота, большинство из которых — россыпные [1]. Для отработки многих из них наиболее приемлемы гидромеханизированные способы, характеризующиеся низкой капиталоемкостью и возможностью рентабельно отрабатывать месторождения со сложными горно-геологическими условиями и небольшим содержанием полезного компонента. Одним из способов гидромеханизированной разработки месторождений является гидромониторная отбойка, использующая энергию напорной струи, истекающей из насадки гидромонитора.

Для определения теоретической силы воздействия струи на забой  $P_o$ , кгс, в соответствии с законом изменения количества движения (или силы удара струи), используется общезвестная формула И. Ньютона

$$P_o = \frac{\rho}{g} Q \cdot v_o = \rho \frac{v_o^2}{g} \omega, \quad (1)$$

где  $Q$  — расход жидкости через насадку,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$v_o$  — скорость истечения струи,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\rho$  — плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\omega$  — площадь сечения струи,  $\text{м}^2$ .

Так как на современных предприятиях обеспечение гидромониторов напорной водой часто происходит посредством оборотного водоснабжения из специальных прудов-отстойников, а скорость осаждения тонкодисперсных частиц в воде очень низкая, то фактически на гидромонитор подается вода с большим содержанием тонкодисперсных грунтовых частиц. Плотность такой воды будет больше плотности чистой воды ( $\rho \geq 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), соответственно,

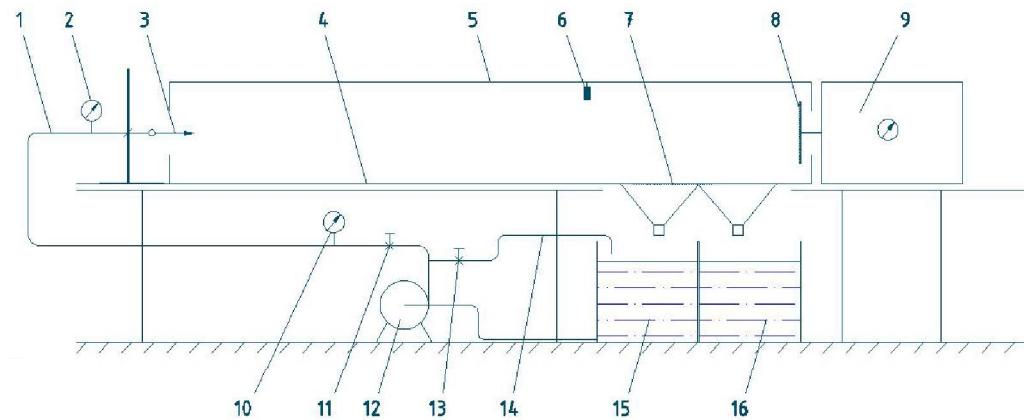
удельный вес единицы ее объема будет увеличиваться.

В связи с этим напорную воду следует относить к неоднородным (гетерогенным) смесям, в которых гипотеза вязкостного трения И. Ньютона (пропорциональность напряжений градиенту скорости относительного движения жидкости) неприменима, и такие жидкости принято называть неньютоновскими.

Таким образом, при работе с напорной водой, подаваемой в гидромонитор, мы имеем дело с неньютоновской жидкостью, для которой формула (1) справедлива лишь отчасти. Кроме того, для исследования силы воздействия струи жидкости на преграду необходимо знать величину  $P_o$  в плоскости забоя, а указанная формула описывает силу воздействия жидкости на преграду в точке истечения струи из насадки гидромонитора. Также из формулы (1) можно сделать вывод, что бесконечное увеличение плотности воды приведет к бесконечному увеличению силы удара струи о преграду, чего фактически быть не может.

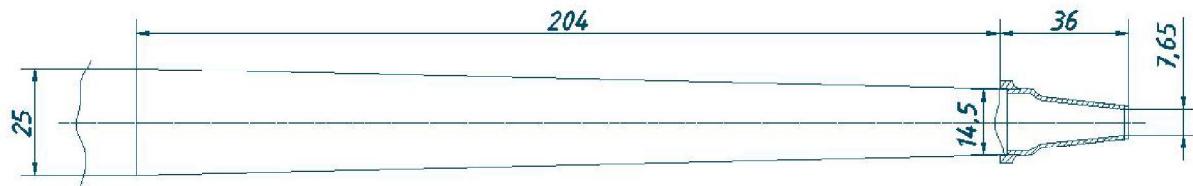
Наличие твердых частиц увеличивает плотность и массу напорной воды, а соответственно, и инерцию, способствующую разрушению массива пород, но возрастающая вязкость воды при этом снижает эффективность работы насосной установки. Таким образом, необходимо определить такое соотношение исследуемых факторов и содержание примесей в напорной воде, которые приведут к повышению эффективности работы гидромониторной установки в целом.

**Методология и методы исследования.** Для исследования указанных процессов создана лабораторная установка [2], выполненная в масштабе 1 : 10 (рис. 1, 2).



**Рис. 1. Стенд для исследования интенсивности гидромониторной отбойки (модель):**  
 1 – подводящий трубопровод; 2 – манометр гидромонитора; 3 – гидромонитор со сменными насадками; 4 – направляющие гидромонитора; 5 – защитный прозрачный корпус; 6 – видеокамера; 7 – шиберная заслонка; 8 – пластина с установленными на ней тензодатчиками, подключенными к ЭВМ 9; 10 – манометр насоса; 11 – кран на подводящем трубопроводе; 12 – насос; 13 – вентиль; 14 – отводящий трубопровод; 15 – расходная емкость, оборудованная ареометром и термометром; 16 – мерная емкость /

**Fig. 1. Booth for the study of the jetting intensity (model):**  
 1 – supply pipeline; 2 – water monitor gauge; 3 – water jet with replaceable nozzles; 4 – guiding of the hydraulic monitor; 5 – protective transparent case; 6 – video camera; 7 – slide gate valve; 8 – plate, with strain gauges mounted on it, connected to a computer 9; 10 – pump manometer; 11 – crane on a supply pipeline; 12 – pump; 13 – valve; 14 – outlet pipeline; 15 – capacity container equipped with a hydrometer and thermometer; 16 – dimensional capacity



**Рис. 2. Конструкция модели ствола гидромонитора /**  
**Fig. 2. Construction of the model of the hydraulic monitor shaft**

Исходные данные для моделирования исследуемых процессов представлены в таблице. Здесь и далее индексами «н» и «м» обозначены натурный (реальный) и модельный объект соответственно.

При моделировании процессов соблюдено геометрическое подобие элементов, а также подобие процессов, протекающих в системах реального и модельного образца.

Геометрическим подобием установлены линейные размеры модели. Параметры, зависящие от гидравлических характеристик установки, принимались, исходя из критерии подобия процессов, протека-

ющих при работе гидромониторной установки.

Плотность чистой воды принята  $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ , так как при работе в реальных условиях в зависимости от температуры она будет меняться незначительно: при изменении температуры от -10 до +10 °C минимальная плотность воды составит  $998,15 \text{ кг}/\text{м}^3$  [3]. Значение температуры к изменяемым факторам не относим, так как ее влияние, как фактора, уже учтено в изменении плотности воды  $\rho$ .

Содержание твердых частиц в воде с и ее плотности  $\rho$  произведено для случая,

когда удельный вес грунтовых частиц составил  $\gamma = 1,6 \text{ т/м}^3$ .

Размеры забоя приняты также в масштабе 1 : 10 и составят  $3 \times 3 \text{ м}$  для натуры и  $0,3 \times 0,3 \text{ м}$  — для модели.

*Результаты исследования.* Практикой установлено, что размыв в целике целесообразно осуществлять при расстоянии от забоя до насадки гидромонитора, не превышающем  $0,25 \dots 0,30$  величины напора. Таким образом, максимальное рассто-

жение от насадки гидромонитора до забоя в натурном варианте составит  $L_n = 18 \text{ м}$ , для модельного образца это расстояние принято в соответствии с числом Фруда,  $L_m = 3 \text{ м}$ . Минимально возможное расстояние установки гидромонитора от забоя определяется как  $a_k = 0,5 \dots 1,2$  от высоты уступа, и для эксперимента составит  $L_{min} = 0,3 \cdot 0,5 = 0,15 \text{ м}$ . Исходные данные моделирования представлены в таблице.

Исходные данные моделирования / *Simulation input data*

Диаметры насадок, мм / Diameter of nozzles, mm	$d_n$	5,1 7,6 10,2
Подаваемый напор, м / Flow rate, m	$H_0$	10-20
Расстояние от насадки гидромонитора до забоя, м / Distance from hydromonitor nozzle to face, m	$L$	1,5-3,5
Плотность технологической воды $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> (содержание тонкодисперсных грунтовых частиц $s$ , г/л) / Density of process water $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> (content of finely dispersed ground particles $s$ , g/l)	$\rho_1(c_1)$ $\rho_2(c_2)$ $\rho_3(c_3)$ $\rho_4(c_4)$ $\rho_5(c_5)$	1000(0) 1011,3(30) 1022,5(60) 1033,75(90) 1037,5(100)

Потери напора в модельной установке незначительны и в расчетах не учитываются.

Обобщение результатов экспериментальных исследований для получения конкретных расчетных зависимостей проведено на основе выводов теории подобия [5].

Если известно, что две системы подобны, то, вычислив коэффициенты подобия по поведению одной системы (модели), можно судить и то, как будет вести себя реальный объект [Там же].

Для исследуемой модели установлены критерии подобия: Рейнольдса ( $Re$ ), характеризующий соотношение между силами вязкости и инерционными силами; Фруда ( $Fr$ ), показывающий подобие гидравлических качеств струи и влияние силы тяжести на свободную часть гидромониторной струи (от насадки до забоя),

и Ньютона ( $Ne$ ), определяющий, что сила удара о забой в натурном и модельном образце будет подобна.

Критерий Рейнольдса  $Re$  [5] характеризует соотношение между силами вязкости и инерционными силами

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\mu} = \frac{v \cdot l}{\nu} = \text{idem}, \quad (2)$$

характеристическое число  $\Lambda$  (индикатор подобия):

$$\Lambda = 1 = \frac{\rho_c \cdot v_c \cdot l_c}{\mu_c} = \frac{v_c \cdot l_c}{\nu_c}, \quad (3)$$

где  $l$  — линейный размер, м;

$\mu$  — динамическая вязкость воды, Н · с/м<sup>2</sup>.

В рассматриваемом случае формула (2) выглядит следующим образом:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}. \quad (4)$$

Гидравлический диаметр для трубы круглого сечения, полностью (без пустот) заполненной жидкостью, равен геометрическому диаметру. Тогда число Рейнольдса для натуры и модели составит

$$\begin{aligned} Re_{n_1} &= 1073701; Re_{n_2} = 1610552; Re_{n_3} = 2147403; \\ Re_{m_1} &= 43840; Re_{m_2} = 65761; Re_{m_3} = 87681; \\ \Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_3 &= 24,49. \end{aligned}$$

Как видно из значений критерия Рейнольдса ( $Re$ ), поток воды в стволе гидромонитора будет турбулентен и для модели, и для реального объекта, но характеристическое число  $\Lambda$  указывает, что подобия в этих потоках не будет, так как  $\Lambda \neq 1$ .

При турбулентном режиме движения и шероховатых трубах все опытные точки (значения  $\lambda$  – коэффициента Дарси) располагаются на прямых, параллельных оси абсцисс и соответствующих определенным значениям относительной шероховатости (зона IV вполне шероховатых труб), т. е.  $\lambda$  перестает зависеть от  $Re$  и является функцией только относительной шероховатости [4]. Область, в которой  $\lambda$ , а следовательно, и сопротивление трубы или тела, не зависят от  $Re$ , называется автомодельной.

Определим шероховатость ствола гидромонитора для натурного и модельного образца. Обозначим высоту выступов шероховатости буквой  $\Delta$ . Величину  $\Delta$  называют абсолютной шероховатостью.

С целью упрощения расчетов вводят понятие эквивалентной шероховатости  $\Delta_s$ , для рассматриваемых вариантов значения  $\Delta_s = 0,09$  мм.

Тогда соотношение  $\Delta$  и  $d$  для реальной системы составит  $\Delta_s/d_n = 0,09/250 = 0,00036$ , а для модели –  $\Delta_s/d_m = 0,09/25 = 0,0036$ .

Воспользовавшись nomogrammой для определения коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  от числа Рейнольдса  $Re$  при различных отношениях эквивалентной шероховатости трубы  $\Delta_s$  к её внутреннему диаметру  $d$  (по данным исследований Г. А. Мурина), показывающим границы автомодельной зоны, видим, что все значения числа  $Re$  попадают в автомодельную

зону, а значит, движение частиц потока воды внутри реального и моделируемого гидромониторов будет подобно.

Нахождение сил давления струи гидромонитора на забой для натуры и модели определяется критерием подобия Ньютона ( $Ne$ ) [5], т. е. случай обтекания неподвижного тела жидкой средой:

$$Ne = \frac{F}{\rho \cdot l^2 \cdot v^2} = \text{idem}, \quad (5)$$

$$\Lambda = 1 = \frac{F_c}{\rho_c \cdot l_c^2 \cdot v_c^2}, \quad (6)$$

где  $F$  – сила давления на твердое тело движущейся жидкости,  $\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$ .

Тогда для рассматриваемого случая моделирования (5) примет вид

$$Ne = \frac{F}{\rho \cdot S \cdot v^2}, \quad (7)$$

где  $S$  – площадь сечения насадки.

По результатам расчета для модели и реального объекта  $Ne = 1$ , характеристическое число  $\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_3 \approx 1$ .

Таким образом, критерий подобия Ньютона  $Ne$  и его характеристическое число показывают, что силы давления струи гидромонитора для реального объекта и модели на забой будут подобны – пропорциональны масштабу подобия.

Для определения подобия некоторых геометрических размеров натуры и модели, таких как расстояние от насадки до забоя, воспользуемся критерием подобия Фруда [5], который характеризует соотношение инерционных сил и сил тяжести (эти силы в подобных системах пропорциональны):

$$Fr = \frac{v^2}{l \cdot g} = \text{idem}, \quad (8)$$

$$\Lambda = 1 = \frac{v^2}{g_c \cdot l_c}. \quad (9)$$

Как сказано ранее, линейный размер  $l$  (в исследуемом случае – расстояние от насадки гидромонитора до забоя) будет равен:  $L_n = 18$  м, для модельного –  $L_m = 3$  м. Тогда

$$\text{Fr}_h = \frac{(32,59)^2}{18 \cdot 9,81} = 60,10; \text{Fr}_m = \frac{(13,3)^2}{3 \cdot 9,81} = 6,016,$$

$$\Lambda = 0,9997 \approx 1.$$

**Заключение.** Критерий подобия Фруда и его характеристическое число (индикатор подобия  $\Lambda$ ) показывают, что соотношение инерционных сил и сил тяжести в рассматриваемых системах пропорциональны. Данные, полученные в результате экспериментов, проведенных на рассмотренном стенде, сконструированном с учетом

рассчитанных ранее параметров и критериев подобия, соответствуют натурным значениям с учетом масштаба (1 : 10).

При помощи представленной лабораторной установки возможно проводить необходимые эксперименты для определения интенсивности гидромониторной отбойки в результате изменения плотности воды, в различных горнотехнических условиях, выявить их влияние и определить сочетание указанных факторов, позволяющее повысить эффективность добычи полезного ископаемого.

### Список литературы

1. Модели месторождений золота Енисейской Сибири / под ред. С. С. Сердюка. Красноярск, 2010. 584 с.
2. Патент 169574 РФ, МПК E21C 45/00. Стенд для исследования интенсивности гидромониторной отбойки / В. Е. Кисляков, Н. А. Шкарuba, М. В. Калмаков, Д. С. Россянский, Д. Е. Килин, А. В. Марготнов, Е. Н. Трифонов, Н. А. Аксаментов; опубл. 23.03.2017. Бюл. № 9. 3 с.
3. Плотность воды [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.chemport.ru/data/data35.shtml> (дата обращения: 12.08.2018).
4. Kundu P. K., Cohen I. M., Dowling D. R. Fluid Mechanics. Elsevier, 2016. 928 с.
5. Weisberg M. Simulation and similarity. Using models to understand the world. Oxford: Oxford University Press, 2013. 224 с.

### References

1. *Modeli mestorozhdeniy zolota Eniseyskoy Sibiri* (Models of gold deposits of the Yenisei Siberia) / ed. S. Serdyuk. Krasnoyarsk, 2010. 584 p.
2. Patent 169574 RF, MPK E21S 45/00. Stend dlya issledovaniya intensivnosti gidromonitornoy otbojki (Patent No. 169574 of the Russian Federation, IPC E21S 45/00. Stand for investigating the intensity of jetting breaker); V. E. Kislyakov, N. A. Shkaruba, M. V. Kalmakov, D. S. Ros'yansky, D. E. Kilin, A. V. Margotnov, E. N. Trifonov, N. A. Aksamentov; publ. 23.03.2017, bul. no. 9, 3 p.
3. *Plotnost vody* (Density of water). Available at: <http://www.chemport.ru/data/data35.shtml> (Date of access: 12.08.2018).
4. Kundu P. K., Cohen I. M., Dowling D. R. *Fluid Mechanics* (Fluid Mechanics). Elsevier, 2016. 928 с.
5. Weisberg M. *Simulation and similarity. Using models to understand the world* (Simulation and similarity. Using models to understand the world). Oxford: Oxford University Press, 2013. 224 с.

### Коротко об авторах

**Шкаруба Наталья Александровна**, аспирант, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия. Область научных интересов: геотехнологии, гидромониторная отбойка, изыскание технологий повышения эффективности добычи золота на открытых горных работах  
nshkaruba@sfu-kras.ru

**Кисляков Виктор Евгеньевич**, д-р техн. наук, проф. кафедры открытых горных работ, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия. Область научных интересов: геотехнологии, гидромеханизация  
VKislyakov@sfu-kras.ru

**Борисов Федор Иванович**, канд. техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия. Область научных интересов: гидравлика, гидропневмо привод, водоотлив, вентиляция

**Briefly about the authors**

---

**Natalia Shkaruba**, postgraduate, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Sphere of scientific interests: geotechnology, jetting breaking, research technologies to improve the efficiency of gold mining at the open cast mining

**Victor Kisliakov**, doctor technical sciences, professor, Open Mining department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Sphere of scientific interests: geotechnology, hydromechanization

**Fedor Borisov**, candidate of technical sciences, associate professor, Mining Machines and Complexes department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Scientific interests: hydraulics, hydropneumatic drive, water drainage, ventilation

**Образец цитирования**

---

Шкаруба Н. А., Кисляков В. Е., Борисов Ф. И. Особенности обоснования параметров моделирования размыва горных пород напорной струей гидромонитора // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25. № 4. С. 32–38. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-4-32-38.

Shkaruba N., Kislyakov V., Borisov F. Peculiarities of justification of the model parameters of jetting jet erosion of rocks // Transbaikal State University Journal, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 32–38. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-4-32-38.

Статья поступила в редакцию: 10.09.2018 г.

Статья принята к публикации: 18.04.2019 г.

