

И.А. Матвеев, А.И. Матвеев, Ю.М. Григорьев, Н.Г. Еремеева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ВОДНОМ ПОТОКЕ

Аннотация. Приведены результаты экспериментального изучения поведения минеральных частиц уплощенной формы при перемещении их в водной среде по наклонной и искривленной поверхности. Перемещение частиц скольжением по днищу наклонно установленной трубки показали, что при достижении определенной скорости погружения частиц, они переворачивались и перемещались, далее, ориентированными длинной осью перпендикулярно к стенке трубки. В случае использования восходящего потока воды по искривленной поверхности выявлено существование определённого угла наклона поверхности, при котором происходит мгновенный переход (срыв) частиц уплощенной формы с поверхности в объем потока сопровождаемый выносом ее из трубки. Для изучения эффекта разворота частиц пластинчатой формы в водной среде при перемещении по наклонной поверхности падающей под собственным весом и увлекаемым восходящим потоком воды, проведены экспериментальные работы на лабораторном стенде с тонкими пластинками меди, алюминия, стали и золота. Всего проведено более 2000 экспериментов по определению угла разворота с последующим отрывом. На основании полученных результатов разработана математическая модель, описывающая особенности перемещения тонкой прямоугольной пластинки, в вертикально направленном потоке жидкости внутри искривленной трубы.

Ключевые слова: минеральная частица, угол наклона, искривленная поверхность, трубка, математическая модель.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-171-177

В последние десятилетия большинство золотодобывающих организаций переходят на обогащение мелкого и тонкого золота, но при их обогащении существует ряд проблем, связанных с большими потерями с хвостами. По многочисленным литературным и на основании практических данных установлено, что современные золотодобывающие предприятия, использующие традиционное обогатительное оборудование, такие как стационарные шлюзы, отсадочные машины, винтовые шлюзы и т.д., при оптимальных режимах работы потери мелкого золота крупностью менее 0,2 мм составляют 25–54%. Причем форма частиц золота имеет преимущественно уплощенную

форму. Для россыпного золота это больше естественная форма, а для рудного золота такая форма имеет техногенное происхождение (вальцевание в шаровых мельницах). На практике обогащения, золото уплощенной формы относят к трудно извлекаемым, иногда часто в литературе встречается информация о «плавучей форме» золота.

Особенность поведения такой формы частиц и связанные с ними потери обусловлены тем, что в реальных обогатительных процессах, реализуемых в гравитационных аппаратах происходит движение минеральных частиц по наклонной и искривленной поверхности. Поэтому знание особенностей поведе-

ния разных частиц необходимо при их разделении.

Ранее поведение частиц в жидкости изучалось рядом исследователей, таких как Б.В. Кизевальтер, А.Ш. Гершенкоп, А.И. Васильев и т.д. [1–6]. Но детального исследования характера движения частиц уплощенной формы в восходящем потоке встречается редко.

При изучении поведения частиц по наклонной поверхности были использованы частицы магнетита, пирита, кварца, свинца, золото с различной длиной, шириной и толщиной. Измерения скорости перемещения частиц проводились в стеклянной трубке, заполненной водой, которая устанавливалась под различными углами наклона относительно горизонта. С целью снятия влияния силы трения частицы о стенку ее установили на вибратор. Частица опускалась в воду, производили замеры скорости погружения ее при разных углах наклона трубки.

Результаты показали, что по мере уменьшения угла наклона трубки к горизонту, скорость перемещения вдоль трубки у одних частиц понижается, у вторых — не изменяется и остается той же самой, а у третьих — повышается. Выявлено, что на скорость перемещения плоских частиц влияет отношение их ширины к толщине. У частиц имеющих клиновидный контур при уменьшении угла наклона трубки скорость увеличивается. Частицы золотин перемещаются ориентировано длинной частью вкrest направления движения. Некоторое расстояние частица уплощенной формы движется плашмя стенке трубки, затем ее передний край под воздействием набегающего встречного потока, который проникает под пластинку, поднимает вверх ее передний торец и ориентирует ее наибольшей плоскостью навстречу потоку [6]. Вместе с тем, если организовать такие условия, при которых частицы не могут быть ориентированы наи-

большей плоскостью навстречу потоку, то тогда скорость перемещения может значительно возрастет. Отсюда следует, что при разработке гравитационных обогатительных установок полезных ископаемых уплощенной формы (золото, платина) следует стремиться организовать такие условия, при которых их частицы были бы ориентированы длинной осью вдоль потока.

Экспериментальные исследования по изучению поведения минеральных частиц в восходящем потоке по наклонной поверхности под воздействием восходящего потока воды проведены на лабораторном стенде конструкции ИГДС СО РАН.

Лабораторный стенд состоит из искривленной трубы, которая загнута под определенным радиусом и имеет патрубки для подачи воды и разгрузки. Искривленная труба градуирована для определения угла наклона в точке нахождения испытываемой частицы, вертикально к трубе прикреплена стеклянная трубка, через которую погружаются испытываемые образцы определенной формы. Образец опускается в искривленную трубу через вертикальную трубку, затем через патрубков, вода подается под давлением. Скорость подачи воды регулируется краном. Частицы попадая в трубу под воздействием потока воды начинают движение, в котором создается восходящий поток.

В ходе эксперимента проводится наблюдение за перемещением частицы по искривленной поверхности трубы, фиксируются: момент страгивания, точки отрыва испытываемых материалов в водном потоке по мере увеличения потока воды. Расход воды измеряется методом замера объема пропущенной воды через трубу за определенный период времени.

Проведенными исследованиями при изучении поведения минеральных частиц установлено, что уплощенные и уд-

линенные частицы начинают движение ориентированными своей длинной осью вдоль трубы. По мере ускорения потока они постепенно «вползают» на все больший угол наклона дуги. Затем, по достижении определенного угла, резко разворачиваются своим наибольшим сечением поперек направления и выводятся за пределы трубки.

Известно, что методы математического моделирования эффективно применяются при решении практических задач, возникающих в обогащительных процессах [7–9].

Нами предпринята попытка математического моделирования поведения частиц, которая предполагает принятие определенных допущений и условий.

Предполагаем, что имеем частицу в виде тонкой пластинки прямоугольного сечения. Поэтому напором воды на торец пластинки по сравнению с трением о верхнюю поверхность, пренебрегаем. Сила, удерживающая пластинку, создается силой трения жидкости о верхнюю поверхность пластинки.

При одностороннем обтекании тонкой прямоугольной пластинки потоком жидкости со скоростью сила трения равна [10]:

$$F_{тр} = 1,328b\sqrt{\mu\rho vl},$$

где b — ширина; l — длина пластинки; μ — вязкость жидкости; ρ — плотность жидкости; v — скорость жидкости. Тогда условие равновесия пластинки, не дошедшей до точки разворота, состоит в равенстве компоненты силы тяжести, параллельной пластинке, силе трения жидкости о поверхность пластинки:

$$mg \sin \vartheta = 1,328b\sqrt{\mu\rho vl}$$

здесь ϑ — угол наклона трубки в точке равновесия.

Напишем условие предельного равновесия, когда пластинка дошла до точки разворота. При этом предполагаем,

что в точке разворота образуется шарнирное закрепление относительно нижней передней кромки пластинки. Тогда перед разворотом имеем равенство нулю суммы моментов силы тяжести (силой Архимеда пренебрегаем) и силы трения жидкости, приложенной к верхней поверхности пластинки, относительно оси этого шарнира:

$$\begin{aligned} \sum M &= mg \cos \alpha \frac{l}{2} + \\ &+ mg \sin \alpha \frac{d}{2} - F_{тр} d = 0 \\ mg \cos \alpha \frac{l}{2} + mg \sin \alpha \frac{d}{2} - \\ &- 1,328b\sqrt{\mu\rho vl} d = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{l}{d} \cos \alpha + \sin \alpha = \frac{2 \cdot 1,328b}{mg} \sqrt{\mu\rho vl}. \quad (1)$$

где m — масса пластинки, d — толщина пластинки. Из уравнения (1) можно определить предельный угол равновесия α .

Для апробации полученной математической модели проведены эксперименты с использованием пластинки меди, алюминия, стали и золота с одинаковой толщиной (0,014 мм) и шириной (0,2 мм), но с различной длиной от 0,2 мм до 1 мм. Для выявления колебания пластинки и определения угла отрыва велась видеосъемка каждого эксперимента.

Всего проведено более 2000 экспериментов со статистической обработкой полученных данных по определению угла разворота с последующим отрывом. Предполагалось, что одной из причин, приводящих к развороту частицы является возникновение колебательных движений при перемещении частицы, однако не было зафиксировано возникновения устойчивых видимых колебаний пластинки перед разворотом. Возможно любое мелкое колебание выводит пластинку из равновесного состояния,

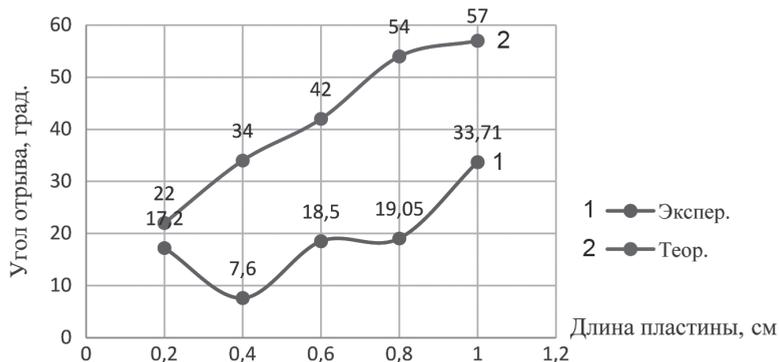


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и теоретических данных угла наклона поверхности в момент отрыва частиц меди

Fig. 1. Comparison of the experimental and theoretical incline angles of surface at the moment of copper particle departure

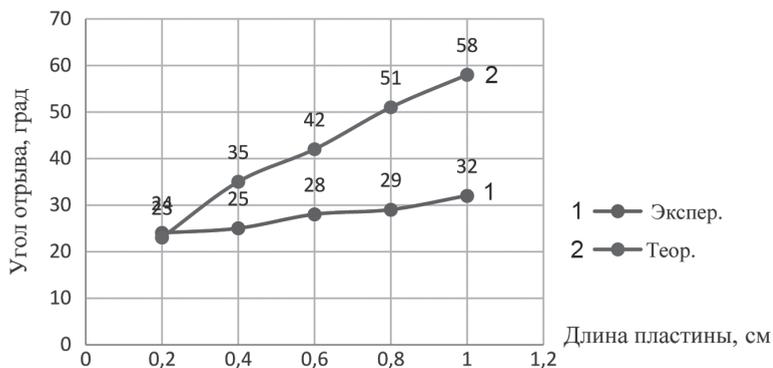


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и теоретических данных угла наклона поверхности в момент отрыва частиц алюминия

Fig. 2. Comparison of the experimental and theoretical incline angles of surface at the moment of aluminum particle departure

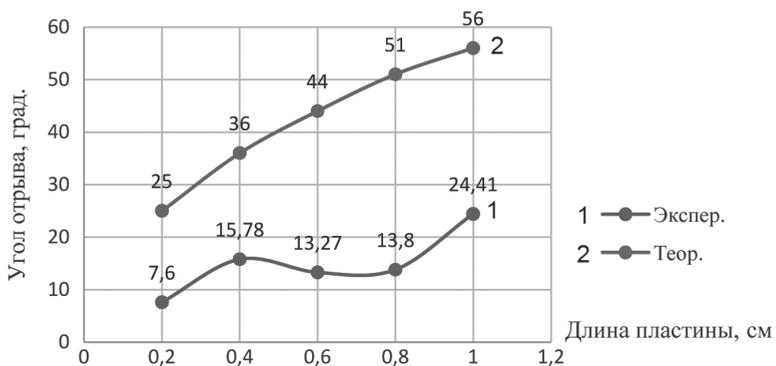


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и теоретических данных угла наклона поверхности в момент отрыва частиц стали

Fig. 3. Comparison of the experimental and theoretical incline angles of surface at the moment of steel particle departure

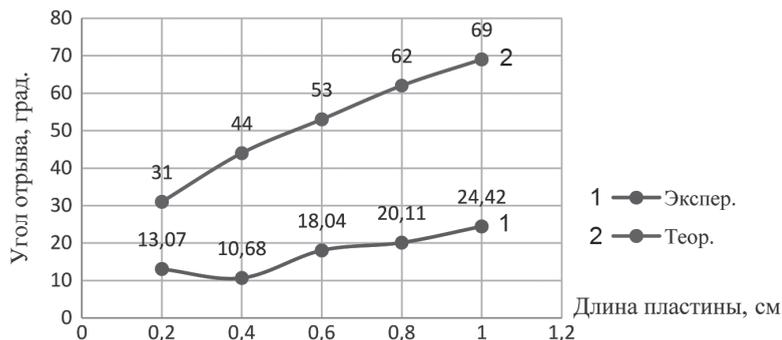


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и теоретических данных угла наклона поверхности в момент отрыва частиц золота

Fig. 4. Comparison of the experimental and theoretical incline angles of surface at the moment of gold particle departure

и приводит к развороту и выносу. Проведена статистическая обработка полученных данных с вычислением среднего значения угла наклона поверхности в момент отрыва пластин. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных углов представлены на рис. 1–4.

Разработанная модель в целом характеризует существующую зависимость длины пластины от угла отрыва для всех испытанных образцов, вместе с тем экспериментальные данные видимо учитывают и другие факторы. Безусловно модель можно адаптировать с учетом этих факторов. При этом модель работает применительно к ламинарным ус-

ловиям течения жидкости. К переходу с ламинарного течения к турбулентному условия кардинально меняются, что требует дополнительных исследований в этой области.

В дальнейшем планируется уточнение разработанной модели движения частиц уплощенной формы.

Полученные результаты могут быть использованы для различных теоретических расчетов при изучении классификации, сгущения, отсадки и других процессов гравитационного разделения, а также для изучения влияния фактора формы и ее вариаций для различных минералов на скорость свободного падения частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кизевальтер Б. В., Гершенкоп А. Ш., Хохуля М. С. Определение скорости падения минеральных частиц пластинчатой формы в жидкой среде // Обогащение руд. — 1982. — № 3. — С. 11–14.
2. Васильев А. М. Анализ формул скорости свободного падения частиц шарообразной формы // Обогащение руд. — 2011. — № 2. — С. 22–26.
3. Кармазин В. В., Раджабов М. М., Измалков В. А. Исследование процесса расслаивания минеральных частиц различной плотности в гравитационно-сегрегационном концентраторе // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 7. — С. 73–78.
4. Blott S., Pye K. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification // Sedimentology. 2008. Vol. 55. pp. 31–63.
5. Rodríguez J. M., Edeskär T., Knutsson S. Particle Shape Quantities and Measurement Techniques — A Review // Electronic journal geotechnical engineering. 2013. Vol. 18. pp. 169–198.
6. Филиппов В. Е., Лебедев И. Ф., Еремеева Н. Г., Гаврильев Д. М. Экспериментальные исследования характера поведения минеральных частиц в гидроакустической среде. — Новосибирск: изд-во «ГЕО», 2013. — 86 с.

7. Григорьев Ю. М., Сивцев В. И., Яковлев Б. В., Савицкий В. Б. К вопросу оценки рисков замерзания дробленой руды при аварийных остановках оборудования // Горный журнал. — 2012. — № 12. — С. 20–21.

8. Григорьев Ю. М., Сивцев В. И., Яковлев Б. В. Термодинамические расчеты растепления руды различной крупности / Физика и физическое образование. Материалы IV Республиканской научно-практической конференции, посвященной 100-летию доцента М.А. Алексеева, г. Якутск 18–19 октября 2012 г. — Якутск: Изд. дом СВФУ, 2012. — С. 237–245.

9. Григорьев Ю. М., Сивцев В. И., Яковлев Б. В. Расчет динамики изменения температуры руды с положительной температурой при дроблении в среде с отрицательной температурой / Физика и физическое образование. Материалы IV Республиканской научно-практической конференции, посвященной 100-летию доцента М.А. Алексеева, г. Якутск 18–19 октября 2012 г. — Якутск: Изд. дом СВФУ, 2012. — С. 245–251.

10. Корпачев В. П. Теоретические основы водного транспорта леса. — М.: Академия Естествознания, 2009. — 237 с. **ТАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Матвеев Игорь Андреевич¹ — младший научный сотрудник,
e-mail: igor.andr.matveev@gmail.com,

Матвеев Андрей Иннокентьевич¹ — доктор технических наук,
зав. лабораторией, e-mail: andrei.mati@yandex.ru,

Еремеева Наталья Георгиевна¹ — научный сотрудник,
e-mail: danng1@mail.ru,

Григорьев Юрий Михайлович — доктор физико-математических наук,
доцент, зав. кафедрой, e-mail: grigyum@yandex.ru,

Физико-технический институт
Северо-Восточного федерального университета
им. М.К. Аммосова,

¹ Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 11, pp. 171–177.

Experimental and theoretical investigation of the behavior of particles in water flow

Matveev I.A.¹, Junior Researcher,
e-mail: igor.andr.matveev@gmail.com,

Matveev A.I.¹, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory,
e-mail: andrei.mati@yandex.ru,

Eremeeva N.G.¹, Researcher, e-mail: danng1@mail.ru,

Grigorev Yu.M., Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Assistant Professor, Head of Chair, e-mail: grigyum@yandex.ru,
Physical and Technical Institute, North-Eastern Federal University
named after M.K. Ammosov,

677000, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia,

¹ Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences,
677018, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia.

Abstract. The experimental data on the behavior of flattened mineral particles in water flow along inclined and curved surface are described. The tests with sliding of particles on the bottom of an inclined tube show that particles having achieved a certain immersion rate turn and move further with their longer axis oriented in perpendicular to the tube wall. In upward water flow on a curved surface, it is found that there exists a certain angle of the surface incline such that flattened particles are instantaneously taken from the flow surface depthward and off the tube. The phenomenon of the flattened particle turn in gravity water flow on an inclined surface and, then, entrainment in upward water flow was studied experimentally in laboratory bench testing of fine plates of copper, aluminum, steel and gold. All in all, more than 2000 tests have been carried out to determine the turn angle and further departure. Developed based on the obtained results, the mathematical model describes the behavior of a thin rectangular plate in the vertical water flow inside the curved tube.

Key words: mineral particle, incline angle, curved surface, tube, mathematical model.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-171-177

REFERENCES

1. Kizeval'ter B. V., Gershenkop A. SH., Khokhulya M. C. Opređenje skorosti padeniya mineral'nykh chastits plastinchatoy formy v zhidkoy srede [Determination of fall velocity of flattened mineral particles in liquid environment], *Obogashchenie rud.* 1982, no 3, pp. 11–14. [In Russ].
2. Vasil'ev A. M. Analiz formul skorosti svobodnogo padeniya chastits sharoobraznoy formy [Analysis of formulas for free fall velocity of ball-shape particles], *Obogashchenie rud.* 2011, no 2, pp. 22–26. [In Russ].
3. Karmazin V. V., Radzhabov M. M., Izmailkov V. A. Issledovanie protsessa rasslaivaniya mineral'nykh chastits razlichnoy plotnosti v gravitatsionno-segregatsionnom kontsentratore [Study of lamination of different density mineral particles in gravity segregation concentrator], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 7, pp. 73–78. [In Russ].
4. Blott S., Pye K. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology.* 2008. Vol. 55. pp. 31–63.
5. Rodriguez J. M., Edeskär T., Knutsson S. Particle Shape Quantities and Measurement Techniques – A Review. *Electronic journal geotechnical engineering.* 2013. Vol. 18. pp. 169–198.
6. Filippov V. E., Lebedev I. F., Ereemeeva N. G., Gavril'ev D. M. *Eksperimental'nye issledovaniya kharaktera povedeniya mineral'nykh chastits v gidroakusticheskoy srede* [Experimental research of behavior of mineral particles in hydro-acoustic medium], Novosibirsk, izd-vo «GEO», 2013. 86 p.
7. Grigor'ev YU. M., Sivtsev V. I., YAKovlev B. V., Savitskiy V. B. K voprosu otsenki riskov zamerzaniya droblenoy rudy pri avariynykh ostanovkakh oborudovaniya [Assessment of risk of crushed ore freezing during emergency shutdown of equipment], *Gornyy zhurnal.* 2012, no 12, pp. 20–21. [In Russ].
8. Grigor'ev Yu. M., Sivtsev V. I., Yakovlev B. V. Termodinamicheskie raschety rastepleniya rudy razlichnoy krupnosti [Thermodynamic calculation of thawing of different size ore particles], *Fizika i fizicheskoe obrazovanie. Materialy IV Respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu dotsenta M.A. Alekseeva*, Yakutsk, 18–19 October 2012, Yakutsk, Izd. dom SVFU, 2012, pp. 237–245. [In Russ].
9. Grigor'ev Yu. M., Sivtsev V. I., Yakovlev B. V. Raschet dinamiki izmeneniya temperatury rudy s polozhitel'noy temperaturoy pri droblenii v srede s otritsatel'noy temperaturoy [Calculation of march of temperature in positive temperature ore under crushing in negative temperature medium], *Fizika i fizicheskoe obrazovanie. Materialy IV Respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu dotsenta M.A. Alekseeva*, Yakutsk, 18–19 October 2012, Yakutsk, Izd. dom SVFU, pp. 245–251. [In Russ].
10. Korpachev V. P. *Teoreticheskie osnovy vodnogo transporta lesa* [Theoretical framework of wood water transport], Moscow, Akademiya Estestvoznaniya, 2009. 237 p.

