

УДК 622.277: 622.234.5

ОРГАНИЗАЦИЯ МАССОПЕРЕНОСА В ЗАТОПЛЕННОМ ОЧИСТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧЕ

Н.Е. Горшенин

Томский политехнический университет

E-mail: nickgor@inbox.ru

Приведены результаты экспериментов по организации массопереноса с помощью гидромониторных струй. Предложена методика расчета гидромониторных струй для предотвращения переотложения тяжелых фракций в очистном пространстве.

Ключевые слова:

Скважинная гидродобыча, гидромониторная струя, массоперенос, опробование, очистное пространство.

Key words:

Hydraulic borehole mining, water jet, slurry transfer, ore sampling, representative sample, stope.

Основные объекты для работ по скважинной гидродобыче (СГД) на сегодняшний день представлены месторождениями рыхлых и слабосвязных материалов, залегающих в сложных горно-геологических условиях, что исключает возможность применения обычных способов разработки и крупнообъемного опробования. Несоответствие проб, полученных методом СГД [1–3] фактическому вещественному составу горной массы в целом ограничивает роль данного способа в геологоразведке и добыче резко разнородных россыпных материалов. Поэтому возникает задача – выполнить анализ причин разубоживания проб и разработать меры по предотвращению этого процесса. Часто предполагают [2], что основной механизм, способствующий разубоживанию руд – это переотложение тяжелых фракций на дне добычной камеры и вымыв только легких составляющих. Это предположение требует глубокого теоретического анализа и экспериментальной проверки, т. к. дальнейшее развитие технологии СГД неизбежно связано с повышением представительности проб при крупнообъемном опробовании и разработке технологии, исключающей переотложение тяжелой фракции в очистном пространстве.

Наибольшее распространение в практике получила односкважинная отработка месторождений с боковым размывом горных пород гидромониторами [4]. Рассматривая данную технологическую схему была поставлена задача – исследовать на ее основе процесс массопереноса в добычной камере и сформулировать условия надежного выноса горной массы из формируемой в процессе гидродобычи полости путем исследования поля придонных скоростей. Для выполнения данных исследований предложен и изготовлен стенд (рис. 1), который состоит из металлического корпуса – 1, внутрь которого вставляется картридж, состоящий из крышки – 2, дна – 3 и перфорированного внутреннего корпуса – 4. Техническая вода от насоса НБ-3 (подача 18...130 л/мин при максимальном давлении нагнетания 3,0 МПа) нагнетается в стенд через патрубков – 5 и гидромонитор – 6, а подъем пульпы осуществляется через пульпоподъемный патрубок

– 7. Необходимое давление на гидромониторе создается при закрытии вентиля – 8. Контроль за расходом жидкости осуществляется с помощью расходомера РС-ТПУ – 9.

Стенд работает следующим образом – на дне картриджа – 3 размещается тонкий слой материала-индикатора – 10 (табл.), затем картридж вставляется в наружный корпус – 1 и герметично закрепляется в нем. По патрубку – 5 и через гидромонитор 6 внутрь герметичного корпуса подается вода от насоса. За счет вытеснения происходит ее отток через перфорированный внутренний корпус – 4 в пульпоподъемный патрубок – 7, а далее за пределы герметичного корпуса. Возникающий поток воды формирует поле скоростей, эквивалентное полю скоростей при всасывании жидкости из добычной камеры с равной производительностью. В созданном поле придонных скоростей происходит частичное очищение дна картриджа – 3 от размещенного на нем материала-индикатора – 10 на некотором расстоянии от всасывающего патрубка, т. е. формируется четкая граница для максимальной транспортирующей (взвешивающей) скорости. После непродолжительного цикла перекачивания жидкости (1...2 мин.) картридж извлекается, дно снимается и фотографируется картина распределения материала-индикатора на нем. Далее на дно картриджа закладывается новая проба материала и эксперимент повторяется.

Экспериментальная часть работ предусматривала выполнение следующих этапов:

1. Привязка скоростей транспортировки материала-индикатора к условиям стенда.
2. Изучение полей скоростей при всасывании с различной интенсивностью.
3. Изучение полей скоростей при воздействии на придонную зону гидромониторных струй различной энергии и направления.

Для определения площади и радиусов очистных площадей полученные фотографии распределения материала на дне стенда обрабатывались в редакторе Autodesk Inventor, где производилось измерение геометрических размеров и площадей получаемых участков смыва для исследуемых образцов.

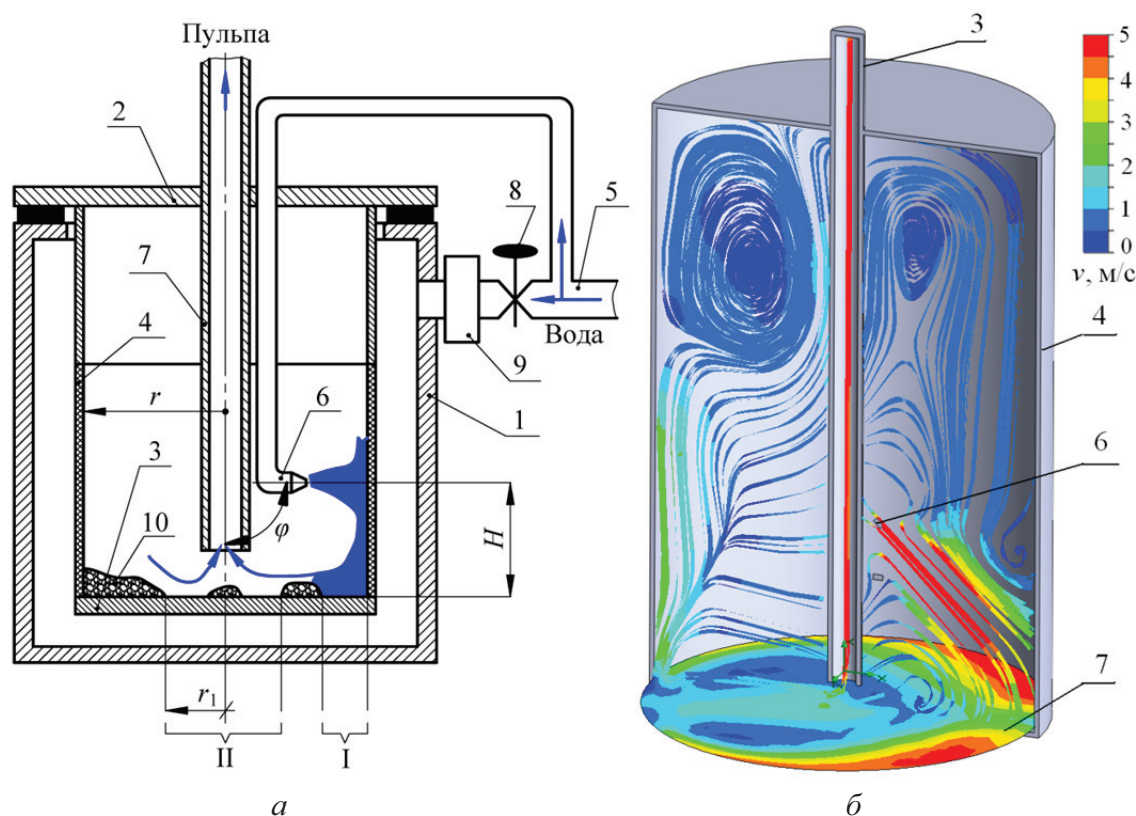


Рис. 1. Стенд для исследования процессов массопереноса в очистном пространстве: а) конструкция стенда; б) модель работы стенда в CosmoFloWorks

Разработка стенда и постановка пробных экспериментов сопровождалась моделированием гидравлических процессов в среде редактора COSMO-FloWork.

Таблица. Общая характеристика образцов-индикаторов придонных скоростей

Образцы	Размер, мм	Плотность, г/см ³	Гидравлическая крупность, см/с	Транспортирующая скорость, м/с
Песок	0,05...0,25	2,2...2,4	3,8...8,3	0,077...0,082
Гравий	3...5	2,2...2,4	19...23	0,121...0,122
Сталь	0,7×1...2,5	7,8	34	0,274...0,301
Медь	1,7×3...4	9,0	70	0,376...0,409

Рассматривая механизм транспортирования горной массы в добычных камерах по результатам первого этапа, следует отметить следующее:

- практическое значение имеют только «взвешивающие» транспортирующие скорости (наблюдается процесс псевдосжижения материала [5, 6]), т. к. в режиме донного влечения твердых частиц производительность массопереноса малозначима;
- транспортирующая возможность потока будет определяться в совокупности его скоростью, турбулентностью и гидравлической крупностью влекомого материала;
- транспортирующая возможность потока для разнородной горной массы будет определяться

по самой трудно транспортируемой составляющей, т. к. оседая, она будет препятствовать выносу более легких фракций.

Работа снаряда СГД при условии плоского неразмываемого дна создает определенное поле скоростей. Как показали проведенные эксперименты (этап 2, 3), в придонной области формируется 2 зоны эффективного массопереноса (рис. 1, а): I – поле всасывания; II – поле отраженной гидромониторной струи.

Очевидно, что при соединении I и II зон, площади которых соответственно A_1 и A_2 , м² будет достигнуто условие эффективного выноса всех фракций горной массы. Регулировать размеры зоны I возможно, изменяя производительность по всасыванию пульпы. Исследование формирования поля скоростей при всасывании, формирования воронки всасывания, интенсивности процесса всасывания отражено в работах [2, 6–8], в частности изучены вопросы гидротранспорта непосредственно при СГД. Однако, в данных работах не была рассмотрена задача обеспечения выноса всех групп минералов из очистных пространств, что и является целью данного исследования.

На втором этапе работ было выполнено исследование процесса всасывания, с тем отличием от работ [2, 6, 7], что грунт всасывался с некоторой неразмываемой плоскости, а затем фиксировался радиус зоны размыва. Эксперименты были выполнены при различной интенсивности всасывания

(40...130 л/мин), высоте позиционирования всаса над неразрываемой плоскостью (10...50 мм), диаметре всаса (20...150 мм). Выполненные исследования подтвердили сделанный ранее вывод о том, что скоростное поле в плоскости всаса резко ослабляется в радиальном направлении по мере удаления от него [2].

Установлено, что увеличению радиуса зоны всасывания способствует уменьшение высоты позиционирования всаса над забоем и увеличение радиуса всаса (при неизменной интенсивности всасывания). В общем плане скоростного поля изменение диаметра и высоты позиционирования всаса над плоскостью всасывания приводит к локальному его перераспределению в области всаса. По результатам опытов был сделан вывод о том, что придонное поле скоростей с рядом допущений можно описать зависимостью, полученной из условия неразрывности потока, полагая, что в полусфере радиуса r_1 , м, при отсутствии гидравлических сопротивлений действует точечный источник депрессии, интенсивность всасывания для которого равна q , м³/с:

$$v = \frac{q}{2\pi r_1^2},$$

где v – критическая (взвешивающая) скорость, м/с.

Результаты исследований воздействия бокового гидромонитора на смыв образцов-индикаторов в придонной зоне позволяют связать площадь зоны II с мощностью гидромониторной струи:

$$A_2 = w/w_0,$$

где w_0 – удельная мощность гидромониторного транспорта, кВт/м², которая по результатам исследований остается постоянной при разной мощности струи w , Вт:

$$w = P_j Q_j,$$

где P_j – динамическое давление гидромониторной струи в начальном сечении, Па; Q_j – расход жидкости через сопло гидромонитора, м³/с.

Значение w_0 зависит от высоты сопла гидромонитора над плоскостью всасывания H , м; угла атаки на стенку скважины φ , град; и необходимой придонной скорости v , м/с, которую мы принимаем равной скорости транспортирования наиболее трудноудаляемых фракций грунта. Выполнив серию опытов при различных значениях H , φ , v (рис. 2), по результатам статистической обработки результатов, получаем следующую зависимость для определения удельной энергии гидротранспорта:

$$w_0 = v^{1-0,005\varphi} (0,26\varphi + 7).$$

Данная формула справедлива при соотношении высоты сопла гидромонитора над забоем скважины и радиуса камеры, равном:

$$H/r = -0,024\varphi + 3,11,$$

где H – высота позиционирования гидромонитора, м; r – радиус очистной камеры, м. Из рис. 3 видно, что изменение высоты позиционирования гидромонитора над плоскостью всасывания не рационально, т. к. данное соотношение описывает оги-

бающую максимумов эффективности воздействия струи на дно очистной камеры.

Эффективная очистка забоя будет обеспечена при выполнении соотношения:

$$A = A_1 + A_2 > 40...50 \%,$$

т. е. должен обеспечиваться снос грунта примерно с половины очистного пространства. Преобразуем данное выражение, определяя площадь очистного пространства через выше приведенные формулы:

$$\frac{q}{2v} + \frac{w}{v^{1-0,005\varphi} (0,26\varphi + 7)} \geq 0,5\pi r^2.$$

В большей степени на размер очистной площади оказывают гидромониторные струи, поэтому преобразуем выражение к следующему виду:

$$w \geq \left[0,5\pi r^2 - \frac{q}{2v} \right] [v^{1-0,005\varphi} (0,26\varphi + 7)].$$

Чтобы привязать результаты исследований к различным размерам очистных пространств, введем масштабные коэффициенты, значения которых получены на основе критериев подобия Рейнольдса и Ньютона [9]:

$$r = 0,34 \text{ м}; k_R = R/r = 2,9R; k_q = Q/q = k_r;$$

$$k_v = V/v = k_R^{-1}; k_w = W/w = k_R^{3/2}.$$

С учетом масштабных коэффициентов и при $\varphi=90^\circ$ вышеприведенное выражение принимает вид:

$$W \geq \left[46 - \frac{270Q}{2V} \right] R^{2,05} V^{0,55}.$$

Полученное выражение можно использовать как основное условие для расчета гидромониторных струй на обеспечение эффективного удаления грунта с предельной транспортирующей скоростью V при радиусе очистного пространства, равном R . Если первостепенное значение имеет обеспечение заданного радиуса размыва, то это условие возможно использовать для проверочного расчета на обеспечение снарадом полной и качественной очистки формируемого очистного пространства.

Учитывая то, что в выполненном исследовании стенка, от которой отражалась струя, была неразрываемой и непроницаемой, при расчете для реальных добычных камер целесообразно ввести коэффициент запаса не менее 1,5...2,0. Кроме того, для обеспечения выноса грунта с площади всей очистной камеры необходимо периодически поворачивать гидромониторный снаряд или обеспечить его медленное непрерывное вращение.

Для примера сопоставим полученные результаты с результатами отработки Лукояновского титанильменитового месторождения [10]. При разработке месторождения имела место технологическая схема, подобная рассмотренной. Мощность гидромониторного узла была в пределах 100 кВт, при Q_j и P_j соответственно в пределах 110 м³/ч и 3,0 МПа. Радиус очистного пространства оценивался не менее, чем 5 м. В соответствии с изложенной методикой, необходимая предельная мощность гидромо-

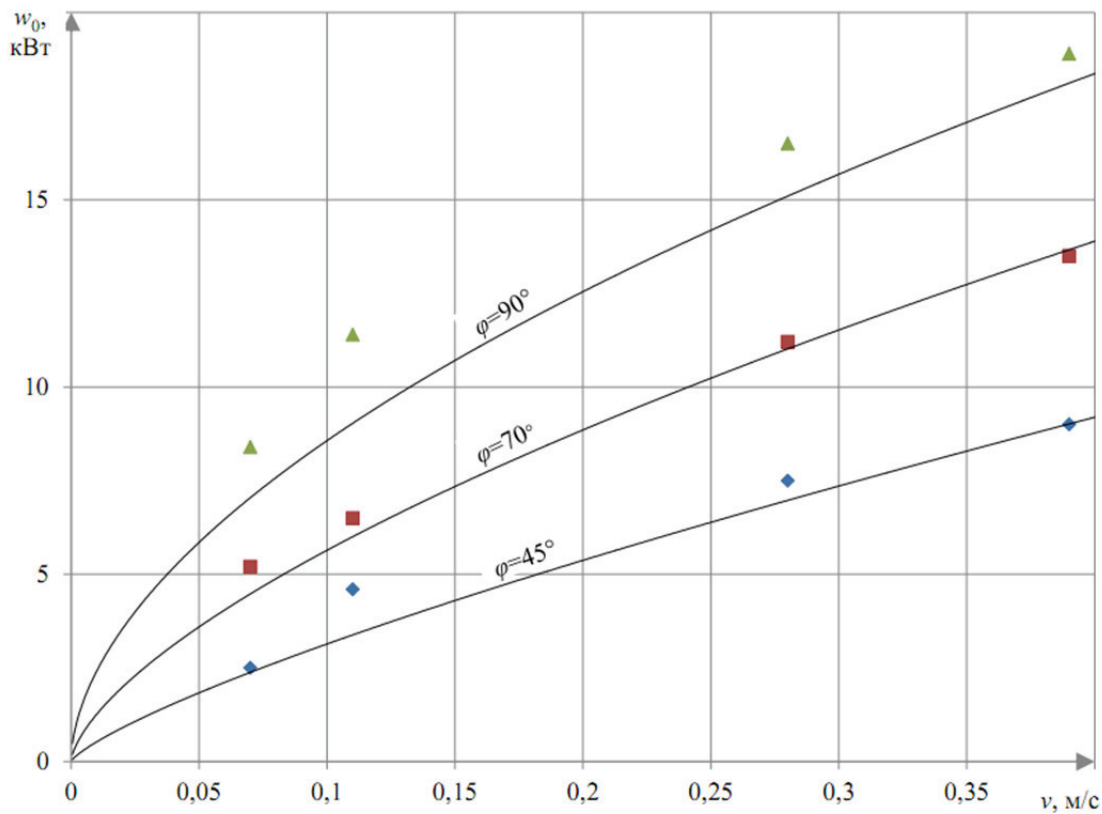


Рис. 2. Зависимость удельной энергии гидротранспорта w_0 грунта от смывающей скорости жидкости v при различных углах атаки гидромониторной струи φ

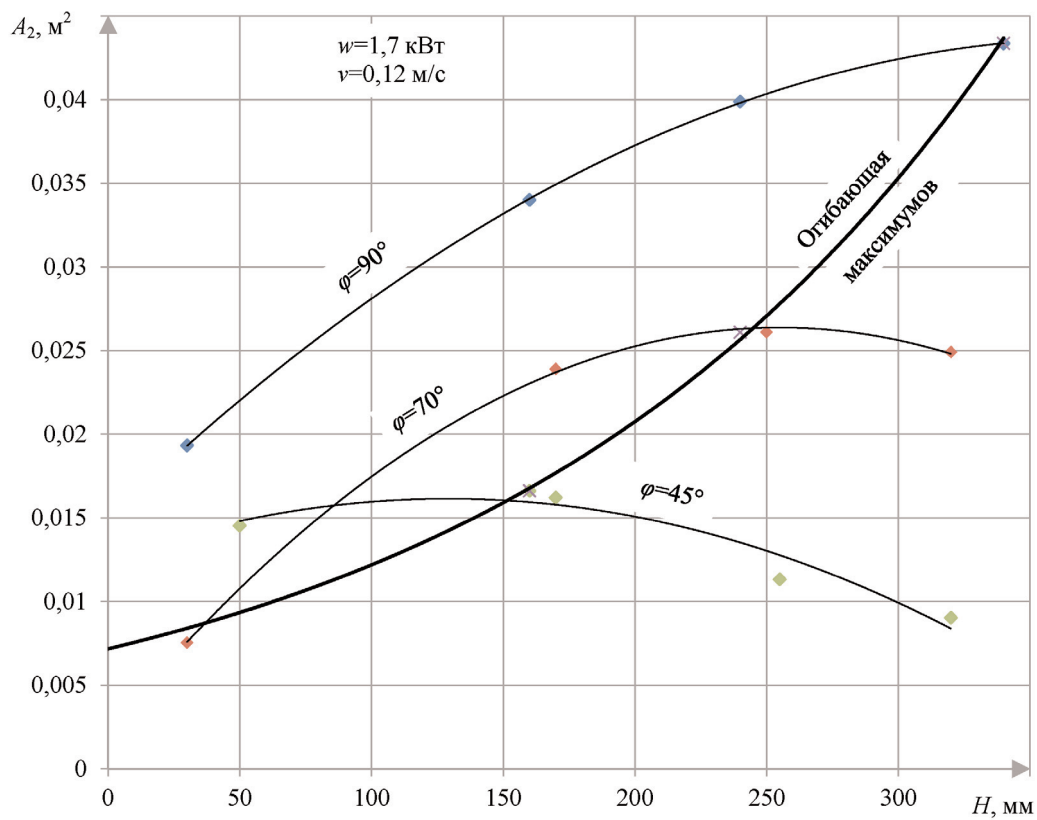


Рис. 3. Зависимость очистной площади A_2 от высоты позиционирования гидромонитора H при различных углах атаки гидромониторной струи φ

нительного узла для эффективного и полного удаления продуктов разрушения из очистного пространства должна быть равна не менее 160 кВт, а следовательно при добычных работах вполне могло иметь место некоторое переотложение тяжелых фракций и неполный вынос грунта на заключительных этапах отработки очистного пространства. Таким образом, теоретически подтверждается сделанный специалистами вывод о том, что для повышения представительности проб необходимо уменьшать размеры очистного пространства и повышать при этом мощность добычных комплексов и производительность по добыче, а решать проблему увеличения массы проб за счет увеличения количества добычных скважин.

Выводы

1. Проведены эксперименты по организации массопереноса при скважинной гидродобыче в затопленном очистном пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стрельцов В.И., Мининг С.С., Серышев С.Н. Экологические и экономические аспекты освоения глубокозалегающих месторождений КМА // Горный журнал. — 2004. — № 1. — С. 65–68.
2. Фомин Ю.Б. Разработка технологии пульпоприготовления на основании исследований процессов массопереноса твердых частиц при скважинной гидродобыче титано-циркониевых песков: дис. ... канд. техн. наук. — М., 1990. — 176 с.
3. Фролов П.А., Фомин Ю.Б., Федюкин А.Ю. Опытное применение скважинной гидротехнологии для добычи титано-циркониевых песков // I Советско-Югославский симпозиум по проблеме скважинной гидравлической технологии: Матер. симп. — М., 1991. — С. 21–23.
4. Горшенин Н.Е. К вопросу о проектировании скважинной гидродобычи твердых полезных ископаемых // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XIV Междунар. симп. им. акад. М.А. Усова. — Томск, 2010. — Т. 2. — С. 190–191.
5. Разумов И.М. Псевдосжижение и пневмотранспорт сыпучих материалов. — М.: Химия, 1972. — 240 с.
2. Установлено, что обеспечить эффективное удаление горной массы и предотвратить переотложение тяжелых фракций можно путем регулирования мощности, угла атаки и высоты позиционирования над забоем гидромониторной струи при обеспечении вращения гидромонитора.
3. Показано, что основное воздействие на формирование придонного поля скоростей в затопленном очистном пространстве оказывает гидромониторная струя.
4. Доказано, что удельная мощность гидротранспорта грунта посредством отраженной от стенок очистного пространства гидромониторной струи зависит от скорости транспортирования наиболее трудноудаляемой фракции, высоты позиционирования и угла атаки гидромонитора, и не зависит от суммарно затраченной гидравлической мощности и очистной площади.
6. Вильмис А.Л. Совершенствование скважинного крупнообъемного опробования плавунных титан-циркониевых россыпных месторождений: дис. ... канд. техн. наук — М., 2009. — 146 с.
7. Аренс В.Ж., Исмагилов Б.В., Шпак Д.Н. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых. — М.: Недра, 1980. — 229 с.
8. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П.Г. Киселева. — 5-е изд. — М.: Энергия, 1974. — 313 с.
9. Chen Chen, Youhong Sun, Xuewei Feng, Dayong Chen. Bottom hole hydro-transport system in oil shale borehole mining // COSTAR. 2011. URL: http://www.costar-mines.org/oss/30/paper/Paper_18-21-Chen_Chen.pdf (дата обращения: 25.03.2012).
10. Ницевич О.А., Цурло Е.Н., Янушенко А.П. Опыт проведения добычных работ методом скважинной гидродобычи // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 4. — С. 34–42.

Поступила 20.04.2012 г.