

УДК 621.1.016.4

Повышение энергетической эффективности процессов гидродобычи рудного сырья

Н.Н. Елин¹, А.В. Цыплов¹, В.Е. Мизонов²

¹ ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет», г. Иваново, Российская Федерация

² ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: mizonov46@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Применение метода скважинной гидродобычи сдерживается большими энергетическими затратами на подъем рудных материалов с больших глубин залегания. В настоящее время не существует надежной математической модели, позволяющей рассчитывать этот процесс и обеспечивать его оптимальные параметры в целях минимизации энергетических затрат. В связи с этим актуальна задача разработки адекватной модели этого процесса.

Материалы и методы: Предлагаемая математическая модель процесса основана на численном интегрировании системы уравнений, описывающих движение воды в гидродобычном снаряде, движение смеси воды, воздуха и частиц руды в пульпоподъемной трубе и водообмен скважины с продуктивным пластом.

Инженерная методика расчета реализована в виде компьютерной программы «Гидродобыча».

Результаты: Предложены математическая модель процессов гидродобычи и ее компьютерная реализация, позволяющие рассчитать зависимости энергопотребления скважин от режимов их эксплуатации. Представлены результаты численных экспериментов в виде зависимостей энергопотребления скважин от условий их эксплуатации.

Выводы: Предложенная математическая модель процесса и ее компьютерная реализация позволяют повысить энергетическую эффективность процессов гидродобычи путем оптимизации технологических режимов эксплуатации скважин. Результаты численных экспериментов показывают, что модель работает и не противоречит физической сущности процесса.

Ключевые слова: водородная пульпа, скважина, гидродобыча, эрлифт, удельный расход энергии, трехфазная смесь, математическая модель.

Improvement of energy efficiency of crude ore hydromining

N.N. Yelin¹, A.V. Tzyplov¹, V.E. Mizonov²

¹ Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

² Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: mizonov46@mail.ru

Abstract

Background: Applications of the method of hydraulic borehole mining are limited by the high energy consumption on lifting ore materials from big occurrence depths. At present, there is no reliable mathematical model that would allow calculating this process and providing its optimal parameters in order to minimize energy consumption. Therefore, it is urgent to develop an adequate model of this process.

Materials and methods: The proposed mathematical model is based on numerical solution to the set of equations that describe water motion in the hydromining machine, motion of water, gas and ore particles mixture in the pulp lifting pipe, and water exchange of the producing layer hole. The engineering calculation procedures are realized in the computer program «Hydromining».

Results: The proposed mathematical model and its computer realization make it possible to calculate the dependence of power consumption on the borehole operating regimes.

Conclusions: The proposed mathematical model and its computer realization allow improving the energy efficiency of hydromining processes by optimizing technological regimes of borehole operation. The results of numerical experiments show that the model works and does not contradict to the physical sense of the process.

Key words: water-ore pulp, borehole, hydraulic mining, airlift, specific energy consumption, three phase mixture, mathematical model.

Скважинная гидродобыча глубокозалегающего рудного сырья представляет собой весьма сложный процесс [1], который описывается тремя уравнениями:

1) уравнением движения воды или воздуховодяной смеси в гидродобычном снаряде

$$P_3 = P_{уц} + \Delta P_{ц}(Q_{н}, V_{ц}, L_{ц}, H_{ц}, \rho_{в}, d_{ц}); \quad (1)$$

2) уравнением движения смеси «руда+вода+воздух» (выше эрлифтного клапана) или смеси «вода+руда» (от забоя до эрлифтного клапана) в пульпоподъемной колонне

$$P_3 = P_{уп} + \Delta P_n(Q_n, Q_{пн}, Q_{пл}, V_{ц}, V_{п}, L_{п}, L_a, H_{ц}, \rho_v, \rho_w, d_{ц}, d_{п}, d_{п}, b_p); \quad (2)$$

3) уравнением притока/поглощения воды к скважине через призабойную зону

$$P_3 = P_{пл} - Q_{пл}/K. \quad (3)$$

Здесь P – давление; ΔP – перепад давления; Q – расход воды; V – расход воздуха; d – диаметр; L – длина; H – глубина; b – концентрация; ρ – плотность; K – коэффициент продуктивности; индексы: у – устье; з – забой; н – насос; п – пульпоподъемная колонна; ц – центральная труба (гидродобычной снаряд); а – эрлифт; в – вода; ч – частицы; р – руда; пл – пласт.

Конкретный вид зависимости величины ΔP в уравнении (2) от параметров процесса описывается известными законами гидродинамики несжимаемой жидкости, а для расчета величины ΔP в уравнении (3) для трехфазного потока «газ + жидкость + твердые частицы» в пульпоподъемной колонне разработан метод, основанный на представлении его как двухфазного газожидкостного с жидкой фазой в виде суспензии, в которой частицы твердой фазы движутся со скоростью, меньшей скорости воды на величину скорости осаждения этих частиц в неподвижной воде. Для гидравлического расчета газожидкостного потока используется методика [2].

Систему уравнений (1)–(3) следовало бы дополнить уравнениями напорно-расходных характеристик насосов, подающих воду в гидродобычной снаряд, и компрессоров, подающих воздух через эрлифтный клапан в пульпоподъемную колонну. Однако на практике эксплуатация скважины производится при различной глубине регулирования их подач. Поэтому мы считаем правильным задавать величины расходов воды и воздуха и их давлений на нагнетание насосов и компрессоров в исходных данных и в дальнейшем использовать их как управляющие параметры оптимизационной задачи.

Неизвестными в системе уравнений (1)–(3) являются величины забойного давления P_3 , дебит Q_n и приток/поглощение воды пластом $Q_{пл}$. Все остальные параметры задачи должны быть заданы. Пластовое давление определяется по величине статического уровня воды в неработающей скважине, крупность и плотность частиц руды – по результатам лабораторных исследований. Коэффициент продуктивности можно определить с помощью формулы (3) по приемистости скважины при подаче в нее воды по гидродобычному снаряду. Необходимое для этого забойное давление при известном давлении нагнетания на устье $P_{уц}$ рассчитывается по уравнению Бернулли.

Так как все расходные и физические параметры потока в пульпоподъемной колонне (а

при подаче воздуха в гидродобычной снаряд – и в нем тоже) изменяются по длине, расчет производится методом численного интегрирования по участкам небольшой длины, при котором газосодержание, скорость, плотность и другие параметры в конце предыдущего участка используются в качестве начальных параметров при расчете следующего.

Таким образом, математическая модель (1)–(3) позволяет при заданных концентрации руды в воде, крупности и плотности ее частиц, расходах эрлифтного воздуха, подаваемого в центральную трубу и в подъемник, рассчитать дебит скважины заданной конструкции по воде и по руде, а также приток / поглощение воды из пласта.

Зная эти величины можно определить энергопотребление насоса, подающего воду в центральную трубу, и компрессора, нагнетающего эрлифтный воздух.

Методика расчета реализована в виде компьютерной программы «Гидродобыча» в программной среде Microsoft C#, использование которой позволяет управлять режимом эксплуатации гидродобычной скважины для достижения наилучших технико-экономических показателей.

При выборе оптимального режима эксплуатации гидродобычной скважины важное значение имеет учет ее водообмена с продуктивным пластом. Если забойное давление меньше пластового, то происходит приток воды из пласта, что приводит к увеличению затрат на подъем пульпы и на организацию сброса и утилизации избыточного количества воды из системы гидродобычи. Если забойное давление больше пластового, то происходит поглощение части воды продуктивным пластом и необходима подпитка системы водой из внешнего источника, на организацию которой требуются дополнительные затраты. Поэтому одним из условий оптимального режима эксплуатации мы считаем минимальный водообмен между скважиной и продуктивным пластом, т. е. минимальную разницу забойного и пластового давлений. При отсутствии водообмена дебит скважины по воде, равный подаче насосов в гидродобычной снаряд, и их давление нагнетания связаны формулой

$$Q = (P_{уц} - P_{пл} + \rho_v g H_{ц})^{0,5} s^{-0,5}, \quad (4)$$

где $s = 8 \cdot \lambda \cdot \rho_v \cdot L_{ц} \cdot \pi^{-2} \cdot d_{ц}^{-5}$ – сопротивление гидродобычного снаряда.

Согласно (4), для увеличения дебита скважины давление нагнетания насоса следует увеличивать. При $p_{уц} = 0$ получаем расход воды в гидродобычном снаряде при ее безнапорном течении, когда энергозатраты на привод насосов отсутствуют.

Так как давление нагнетания насоса связано с дебитом скважины, то единственным управляющим воздействием при оптимизации

режима ее эксплуатации остается расход эрлифтного воздуха. На рис. 1 представлены результаты расчета зависимостей дебита гидродобывочной скважины по водородной пульпе от подачи эрлифтного воздуха для разных концентраций руды в пульпе, а на рис. 2 – те же зависимости для разных крупностей частиц руды.

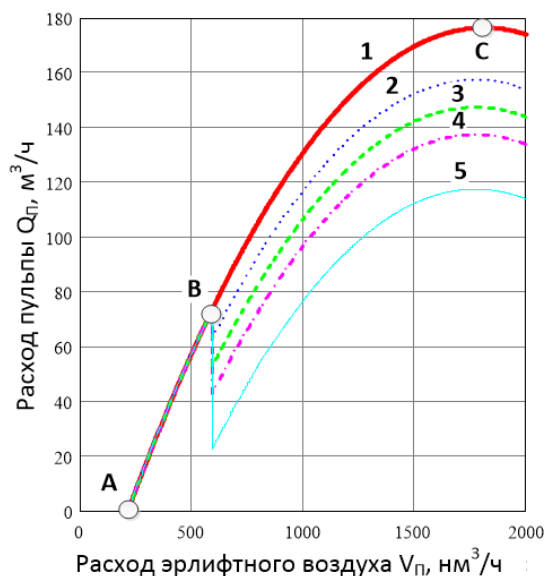


Рис. 1. Зависимость дебита скважины по водородной пульпе от подачи эрлифтного воздуха при крупности частиц 0,5 мм. Массовая концентрация руды в пульпе: 1–0; 2–2; 3–5; 4–10; 5–15 %

При малых подачах эрлифтного воздуха динамический уровень в пульпоподъемной колонне не достигает устья скважины и дебит ее равен нулю. Отрезок OA, отсекаемый кривыми на оси абсцисс, показывает расход эрлифтного воздуха, при котором скважина начинает давать продукцию. При небольших дебитах скорость воды меньше скорости выноса частиц руды и в продукции скважины руда отсутствует. При подаче воздуха, равном V_B , начинается вынос частиц руды и дебит скважины резко уменьшается вследствие увеличения плотности добываемой продукции.

Анализ полученных зависимостей показывает, что уменьшение дебита тем больше, чем больше концентрация руды в пульпе (рис. 1), а величина V_B тем больше, чем крупнее частицы (рис. 2). Влияние увеличения подачи эрлифтного воздуха на увеличение дебита скважины постепенно ослабевает, и наконец, при $V > V_C$ дебит начинает уменьшаться. Это объясняется тем, что в данных условиях увеличение подачи воздуха приводит к увеличению потерь давления на трение в пульпоподъемной колонне, превышающему уменьшение гидростатических потерь.

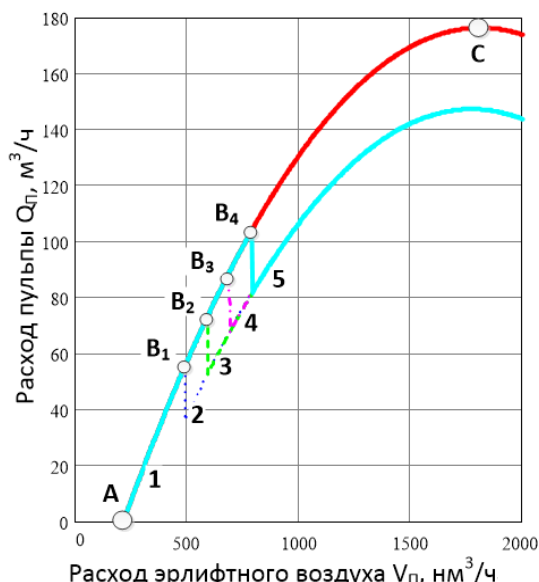


Рис. 2. Зависимость дебита скважины по водородной пульпе от подачи эрлифтного воздуха при массовой концентрации руды 5 %. Крупность частиц: 1–0; 2–0,2; 3–0,5; 4–1; 5–5 мм

Одним из распространенных технологических критериев оптимальности режима эксплуатации систем, потребляющих большое количество энергии, к которым относятся системы гидродобычи рудных строительных материалов, является удельный расход электроэнергии (УРЭ). Для насосов эта величина прямо пропорциональна создаваемому ими давлению и имеет такую же размерность, а для компрессоров в системах эрлифтной добычи УРЭ прямо пропорционален удельному расходу воздуха, равному отношению расхода воздуха к дебиту скважины [3].

На рис. 3 представлен пример результатов расчетов УРЭ на добычу водородной пульпы и их составляющих в зависимости от единственного управляющего параметра – подачи эрлифтного воздуха.

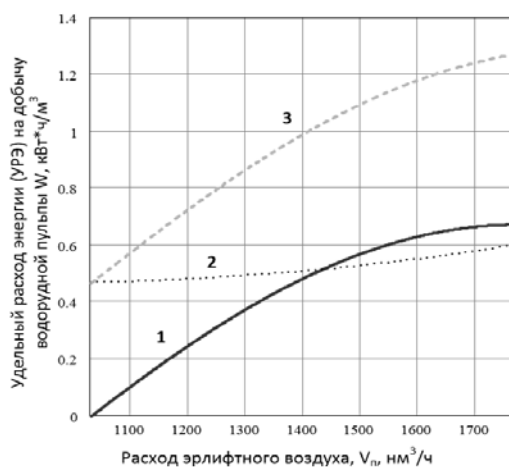


Рис. 3. Зависимость удельных расходов энергии на добычу водородной пульпы от подачи эрлифтного воздуха: 1 – насосы; 2 – компрессоры; 3 – общее

Расчеты выполнены для практически важного диапазона – от режима, при котором реализуется самотечное движение воды в гидродобычном снаряде (затраты энергии на привод насоса отсутствуют, $V = V_{\min}$), до режима максимального дебита ($V = V_{\max}$). Выполненные нами многочисленные вычислительные эксперименты в широком диапазоне конструкций скважин, концентраций и крупностей частиц показали, что минимальная величина УРЭ соответствует режиму, при котором вода подается на забой скважины самотеком. Однако если при оптимизации пользоваться экономическими критериями оптимальности [4], на которые весьма важное влияние оказывают объем добычи и цена реализации продукции, то оптимальный режим будет достигаться при большей подаче воздуха. Чем меньше цена реализации продукции, тем ближе оптимальная подача воздуха к величине V_{\min} , чем больше цена, тем оптимальная подача ближе к V_{\max} .

Компьютерная программа «Гидродобыча» позволяет рассчитывать величину оптимальной подачи эрлифтного воздуха для скважины заданной конструкции в зависимости от концентрации и крупности частиц руды и экономических показателей, а также управлять ее работой при изменении этих параметров. С ее помощью разработаны и внедрены на Белштроицком железорудном месторождении ОАО «Белгородская горнодобывающая компания» энергосберегающие мероприятия,

закрывающиеся в замене части оборудования скважин №№ 6 и 7 и позволяющие снизить удельные энергозатраты на них на 61 %.

Список литературы

1. Елин Н.Н., Цыплов А.В., Шомов П.А. Математическое моделирование процессов гидродобычи железной руды // Информационная среда вуза: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. / ИГАСУ. – Иваново, 2012. – С. 768–770.
2. Brill J. P., Mukherjee H. Multiphase flow in wells. Henry L. Doherty Fund of AIME Society of Petroleum Engineers Inc. Richardson. – Texas, 1999. – 157 p.
3. Теория и практика газлифта / Ю.В. Зайцев, Р.А. Максудов, О.В. Чубанов и др. – М.: Недра, 1987. – 256 с.
4. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. – М.: Химия, 1975. – 575 с.

References

1. Elin, N.N., Tsyplov, A.V., Shomov, P.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessov gidrodobychi zheleznoy rudy [Mathematical modeling of iron ore hydraulic mining]. *Materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnaya sreda vuza»* [Proceedings of the XIXth international scientific and technical conference «University informational environment»]. Ivanovo, 2012, pp. 768–770.
2. Brill, J.P., Mukherjee, H. Multiphase flow in wells. Henry L. Doherty Fund of AIME Society of Petroleum Engineers Inc. Richardson. Texas, 1999. 157 p.
3. Zaytsev, Yu.V., Maksutov, R.A., Chubanov, O.V. *Teoriya i praktika gazlifta* [Theory and practice of gaslift]. Moscow, Nedra, 1987. 256 p.
4. Boyarinov, A.I., Kafarov, V.V. *Metody optimizatsii v khimicheskoy tekhnologii* [Optimization methods in chemical technology]. Moscow, Khimiya, 1975. 575 p.

Елин Николай Николаевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики, теплотехники и инженерных сетей,
e-mail: yelinnn@mail.ru

Цыплов Алексей Викторович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
аспирант,
e-mail: tziplov@mail.ru

Мизонов Вадим Евгеньевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики,
e-mail: mizonov46@mail.ru