значением параметров $P_{сж.\,в.}$ и $N_{п.}$, можно определить, какой тип привода обеспечит наиболее эффективное использование станка по тому критерию, который интересует.

Установлено, что производительность станков с пневмоприводом за счет подбора рациональных параметров может быть увеличена в 1,4 раза, а станков с гидроприводом в 2,4 раза без увеличения удельных приведенных затрат, удельных значений веса и мощности станков.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта на проведение научно-исследовательской работы в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., конкурсы по мероприятию 1.3.1. «Проведение научных исследований молодыми учеными – кандидатами наук».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колодин А.П., Шадрина А.В., Саруев Л.А. Разработка методики оценки технико-экономической эффективности машин для бурения скважин малых диаметров из подземных горных выработок // Вестник ЗСО РАЕН. – Кемерово, 2009. – Вып. 11. – С. 32–39.
2. Баженов В.И. Исследование типа привода бурильных машин вращательно-ударного действия на эффективность бурения скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1975. – 19 с.
3. Казанцев А.А., Саруев Л.А., Саруев А.Л. Техника бурения подземных скважин и анализ динамики колонны штанг малого диаметра при вращательно-ударном нагружении. – Юрга: Изд-во ЮТИ ТПУ, 2007. – 127 с.

Поступила 31.01.2011 г.

УДК 622.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АГРЕГАТА ДЛЯ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ РУД НА ПРИМЕРЕ БАКЧАРСКОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ

Н.Е. Горшенин

Томский политехнический университет
E-mail: nickgor@inbox.ru

Приведена методика математического моделирования работы гидродобычных агрегатов. Математически определены режимные параметры и технико-экономические показатели скважинной гидродобычи на Бакчарском рудопроявлении. Проанализировано влияние подачи насосного агрегата на технико-экономические показатели гидродобычи. Показано, что оптимальный режим достигается при максимально допустимом давлении и предельно достижимом радиусе размыва.

Ключевые слова:
Математическое моделирование, скважинная гидродобыча, гидродобычной агрегат.

Key words:
Mathematical simulation, hydraulic borehole mining, aggregate for borehole mining.

Железорудное проявление, расположенное на территории Бакчарского района Томской области, является перспективным с точки зрения разработки его методами скважинной гидродобычи (СГД). Это обусловлено небольшой глубиной залегания рудных тел, малой прочностью руд, устойчивой кровлей рудных пластов и достаточной мощностью рудных тел.

Промышленный опыт реализации СГД на нескольких месторождениях показал, что данная технология является достаточно сложной из-за большого количества факторов, влияющих на эффективность работы добычных агрегатов [1]. Высокая эффективность СГД может быть получена только при строгой координации всех технологических процессов. В этой связи становится актуальным математическое моделирование системы разработки и работы гидродобычного агрегата, в состав которого входит снаряд СГД и установки, обеспечивающие его работу. Математическое моделирование на стадии проектирования позволит оценить экономический эффект, выбрать рациональные режимные параметры СГД, сравнивать различные технологические схемы добычи с целью выбора оптимальной.

Рассмотрим принцип работы гидродобычного агрегата, рис. 1. В снаряд СГД через верхний оголовок – 1 под давлением подается техническая вода и сжатый воздух. Эти агенты доставляются к нижнему оголовку снаряда – 2 по колоннам водо- и воздухоподающих труб – 4, 5 для выполнения технологических операций: вода для интенсификации процессов обрушения горной породы в добычной камере – 8 и приготовления пульпы, воздух для подъема пульпы вверх по пульпоподъемной колонне – 3 на поверхность, на карту намыва – 7 с помощью эрлифта. Для надежной гидроизоляции добычной камеры от вышележащих горизонтов башмак пульпоподъемной колонны устанавливается в мощное цементное кольцо – 6. При рабо-

те рассматриваемого агрегата будут иметь место следующие процессы:

- нагнетание рабочих агентов в снаряд;
- транспорт рабочих агентов по магистралям снаряда;
- обрушение руды и ее размыв до состояния пульпы;
- доставка пульпы;
- всасывание пульпы;
- подъем пульпы на поверхность (эрлифтирование);
- фильтрация подземных вод в добычную камеру или наоборот.

Поскольку перечисленные процессы взаимосвязаны, необходимо рассматривать их как единую систему. Только системный подход позволит надежно оценить производительность СГД, энергозатраты, дебит, время очистки добычной камеры и другие показатели гидродобычи.

Руководствуясь технологической схемой (рис. 1), произведем моделирование работы снаряда СГД, который был использован при опытно-методических работах на Бакчарском рудопроявлении в 2008 г. для горно-геологических условий рудопроявления, таблица.

Таблица. *Исходные данные для моделирования СГД на Бакчарском рудопроявлении*

Параметры	Обозначения	Значение
Горно-технические условия		
Глубина залегания кровли продуктивного пласта, м	$H_К$	161
Мощность продуктивного пласта, м	m	6
Предел прочности руды на сжатие, МПа	$\sigma_{ГП}$	0,2
Плотность руды, кг/м^3	$\rho_{ГП}$	2150
Статический уровень вод продуктивного пласта, м	$h_{СТ}$	50
Сведения о снаряде		
Гидромониторные насадки: • боковые – кол-во, шт. / диаметр, мм; • концевые – кол-во, шт. / диаметр, мм	 $n_Б/d_Б$ $n_К/d_К$	 2/16 1/10
Глубина спуска смесителя эрлифта, м	H	120
Диаметры колонн (наружный / внутренний), мм: • пульпоподъемной; • водоподающей; • воздухоподающей	 $D_П/d_П$ D/d $D_В/d_В$	 168/152 73,5/67 32/25

При математическом описании процессов динамический уровень вод в скважине принимаем равным статическому уровню для вскрытого водоносного горизонта. Отсутствие перепада давления в совокупности с низкой проницаемостью продуктивного пласта позволяет пренебречь фильтрационными перетоками из пласта в скважину и наоборот. Кровлю продуктивного пласта условно будем считать устойчивой.

Суть математического моделирования будет заключаться в математическом описании работы снаряда СГД в условиях рудопроявления. Математическая модель гидродобычного агрегата включает математические описания всех процессов, имеющих место при СГД. Рассмотрим их подробнее.

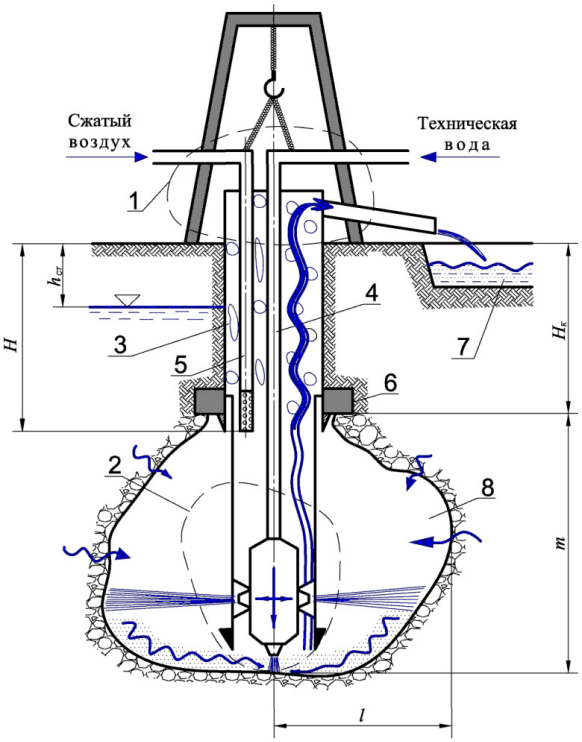

Рис. 1. *Схема гидродобычного агрегата: 1) верхний оголовок снаряда СГД; 2) нижний оголовок снаряда СГД; 3) пульпоподъемная колонна; 4) водоподающая колонна; 5) воздухоподающая колонна; 6) изоляционный мост; 7) карта намыва; 8) добычная камера*

Радиус размыва гидромониторной струей горной породы определим, используя формулу [1]:

$$l = \left(A_1 - B_1 \frac{\mu\sqrt{200g(P_1 - P_2)}}{\nu} \right) d \left(\frac{P_1 - P_2}{\sigma_{ГП}} \right)^{\frac{1}{k_1}},$$

где l – максимально возможный радиус размыва, м; A_1, B_1, k_1 – эмпирические коэффициенты, равные для струй среднего давления, A_1=42,4, B_1=1,6·10^{-6}, k_1=0,85; P_1 – давление в нагнетательной линии перед входом в гидромониторную насадку, зависящее от конструкции нагнетательной линии и расхода жидкости через гидромониторные насадки $Q_Г$, м^3/с; P_2 – давление в добычной камере, P_2 =1,1 МПа (по статическому уровню); ν – кинематическая вязкость воды, ν=10^{-6} м^2/с; μ – коэффициент сопротивления насадки, μ=0,93; g=9,8 м/с^2 – ускорение свободного падения.

Расход жидкости определим из выражения, полученного при применении уравнения Бернулли к процессу истечения жидкости через сопла гидромониторных насадок:

$$Q_Г = \frac{\mu\pi}{4}(n_Б d_Б^2 + n_К d_К^2)\sqrt{200g(P_1 - P_2)}.$$

Производительность гидромониторного размыва определим из соотношения [2]:

$$N_Г = ПA_0,$$

где $N_Г$ – мощность гидромониторов, кВт; A_0 – энергоемкость разрушения 1 т руды, A_0=2 кВт/т; $П$ – производительность гидродобычи, т/ч. Данная зависимость корректна для радиуса действия струи, равного 90 % от максимального по данным промышленного внедрения гидромониторной отбойки горных пород. Следует отметить, что получению пульпы и формированию добычной камеры в большей степени способствует самообрушение рыхлых руд, чем работа затопленных гидромониторных струй.

Рабочее давление насоса (давление на стояке) будет равно сумме потерь давления в магистрали и давления в добычной камере P_2:

$$P_0 = \Delta P_M + \left[\frac{4Q_Г}{\pi(n_Б d_Б^2 + n_К d_К^2)}\right]^2 \frac{1}{200g} + P_2,$$

где $\rho_В$ – плотность воды, $\rho_В$=1020 кг/м^3; ΔP_M – потери давления в водоподающей колонне, определяемые по формуле Дарси–Вейсбаха:

$$\Delta P_M = \lambda \frac{l_К}{d} \frac{v^2}{200g},$$

где λ – коэффициент гидравлических сопротивлений, зависящий от режима течения и геометрических параметров нагнетательной магистрали; $l_К$ – длина нагнетательной магистрали; v=4$Q_П/\pi d^2$ – средняя скорость течения жидкости в водоподающей колонне.

Плотность пульпы будет зависеть от производительности гидромониторного узла:

$$\rho_П = \frac{П + Q_Г \rho_В}{П / \rho_{ГП} + Q_Г}.$$

Подъем пульпы из скважины осуществляется с помощью эрлифта на условную высоту (с поправкой на разность давления столбов жидкости и пульпы), определяемую по формуле [5]:

$$h_У = h_{СТ} + H \frac{(\rho_{ГП} - \rho_В)}{10^4}.$$

Полный расход воздуха, необходимый для подъема пульпы на поверхность, будет составлять:

$$Q_В = Q_П v_0 / 60,$$

где $Q_П$ – производительность эрлифта по пульпе, м^3/ч; v_0 – удельный расход воздуха, определяемый по формуле:

$$v_0 = \frac{h_У}{c} \lg\left[\frac{h_У(k-1)+10}{10}\right],$$

где c – опытный коэффициент [3], зависящий от коэффициента погружения k:

$$k = H / h_У.$$

Рабочее давление воздуха $P_В$, МПа будет равно:

$$P_В = 0,1[h_У(k-1)+5].$$

Мощность, затрачиваемая компрессором:

$$N_В = \frac{LQ_В}{\eta},$$

где η – КПД компрессора, для изотермического цикла работы, η=64 %; L – удельная расходуемая мощность [5], Вт:

$$L = 2,303 \cdot 10^5 \lg\left(\frac{P_В}{P_А}\right),$$

где $P_А$ – атмосферное давление, $P_А$=0,1 МПа.

Объединив вышеприведенные формулы в единую систему и решив ее для условий (табл.), определим производительность гидродобычи и плотность пульпы, которые в среднем будут составлять 17 т/ч и 1100 кг/м^3. Объем руды, который возможно извлечь из добычной камеры, будет составлять 1800 т (на практике полное извлечение массива невозможно). По результатам опытно-методических работ на Бакчарском участке рудопроявления наблюдаемая средняя производительность гидродобычи составляла 15...25 т/ч, плотность пульпы была в пределах 1100 кг/м^3, а объем полученной пробы 700 т. Таким образом, полученные результаты достаточно хорошо сходятся с результатами математического моделирования.

Используя вышерассмотренную расчетную методику, проанализируем зависимость основных режимных параметров гидродобычи от подачи насоса Q:

- производительность гидродобычи
$$П(Q) = f_1(Q);$$
- радиус размыва
$$l(Q) = f_2(Q);$$
- суммарный дебит одной скважины
$$Д(Q) = \pi l^2(Q) m p_{ГП};$$
- суммарная затрачиваемая мощность гидро- и пневмоприводов
$$N_\Sigma = P_0 Q + N_В;$$
- время отработки одной добычной камеры
$$T = \frac{Д(Q)}{П(Q)}.$$

Функции f_1 и f_2 являются решениями для математической модели снаряда СГД при переменном значении расхода воды Q.

Зная основные технические показатели, можно выполнить предварительный экономический анализ СГД. Предположим, что стоимость одной скважины составляет WC=200 тыс. р, ежесуточные расходы на производство работ DC=50 тыс. р, затраты на энергию и расходные материалы в расчете на 1 кВт использованной непосредственно при СГД электроэнергии EC=10 р. Стоимостные показатели позволяют оценить себестоимость продукции и проанализировать влияние на себестоимость режимных параметров:

$$C(Q) = \frac{WC + \frac{DC \cdot T(Q)}{24} + N_\Sigma(Q) EC}{Д(Q)}.$$

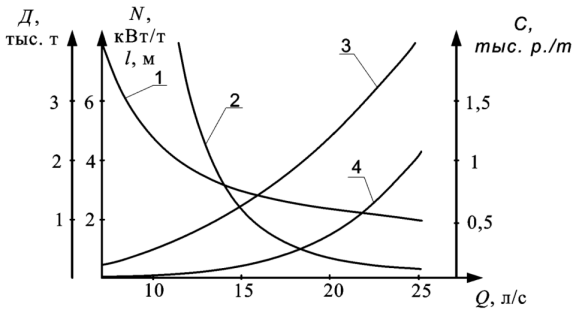

Рис. 2. *Основные технико-экономические показатели СГД в зависимости от расхода рабочей жидкости Q: 1) энергоемкость N, кВт/т; 2) себестоимость добычи С, тыс. р/т; 3) радиус размыва l, м; 4) дебит скважины Д, тыс. т*

Для моделируемого режима работы себестоимость 1 т руды будет составлять 637 р.

На рис. 2 приведены зависимости основных технико-экономических показателей СГД от параметра системы Q, полученные на основе математического моделирования. Зависимости построены с использованием пакета MathCAD по выше предложенной методике вычислений.

С увеличением мощности гидромониторного узла, что достигается увеличением расхода воды Q через гидромониторные насадки, рис. 2, себестоимость добываемой руды снижается. Поэтому при проектировании режима работы гидродобычного агрегата следует ориентироваться на максимально достижимую мощность гидромониторного узла, ограниченную только максимально возможным давлением нагнетания жидкости (6...10 МПа) и реально достижимым радиусом размыва (4...5 м для слабосвязных горных пород).

Выводы

Показана возможность применения метода математического моделирования для анализа и поиска оптимальных режимов работы гидродобычного агрегата в условиях Бакчарского рудопроявления (Томская область). Произведен анализ его работы при изменении одного из режимных параметров скважинной гидродобычи – подачи воды. Показано, что оптимальный режим достигается при максимально допустимом давлении и предельно достижимом радиусе размыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аренс В.Ж. Физико-химическая геотехнология. – М.: Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2001. – 656 с.
2. Калнин Р.А. и др. Справочник горного инженера / под ред. В.К. Бучнева. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 790 с.
3. Дубровский В.В. и др. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду / под ред. В.В. Дубровского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1972. – 512 с.
4. Петухов А.И., Правицкий Н.К., Рипп М.Г. Горная механика. – М.: Недра, 1965. – 400 с.
5. Папаяни Ф.А., Козыряцкий Л.Н., Пащенко В.С., Кононенко А.П. Энциклопедия эрлифтов. – М.: Информатик, 1995. – 592 с.

Поступила 01.02.2011 г.