

Г.С. Крылова, Н.В. Ибрагимова

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА**

Семинар № 15

Как в России, так и за рубежом в последние годы наблюдается устойчивая тенденция снижения качества золоторудного сырья, истощение запасов легкообогатимых золотосодержащих руд и россыпей. Вовлечение в эксплуатацию руд коренных месторождений, являющихся, как правило, упорными, сдерживается отсутствием эффективных технологий их переработки.

Новые экономические требования к качеству минерального сырья и экологическому обеспечению безопасности освоения месторождений резко сузили перечень рентабельных для отработки объектов. В этих условиях большое значение имеет создание и освоение таких технологий эффективной добычи благородных металлов, которые обеспечили бы при более низких капитальных затратах по сравнению с традиционными технологиями, увеличение объемов их производства.

Одной из таких технологий, пригодных для переработки бедных окисленных руд, является технология кучного выщелачивания (КВ) золота, серебра, меди, урана и ряда других металлов. Как показал опыт, эту технологию рентабельно использовать не только для получения благородных металлов из руд, но также и из техногенного сырья (старых отвалов и хвостохранилищ). Большой опыт переработки такого сырья накоплен в США, Австралии и Канаде.

Технология КВ характеризуется низкими капитальными затратами, малооперационностью технологических процессов, что позволяет снизить и эксплуатационные затраты. Снижаются требования к качеству исходного материала, в результате чего появляется возможность расширения минерально-сырьевой базы за счет вовлечения в эксплуатацию забалансового сырья.

Для эффективного осуществления процесса КВ определяющим условием является проницаемость рудной массы в штабеле. Наличие в

бедных окисленных рудах – основном сырье КВ, глинистых и шламистых минералов весьма часто обуславливает низкие фильтрационные свойства материала. Для устранения негативного влияния этого фактора используют окомкование материала с добавками связующего (обычно, портланд-цемента), что позволяет резко повысить проницаемость материала. Расход связующего составляет, как правило, 4–5 кг/т руды, иногда до 15 кг/т. При более высоких расходах связующего процесс становится малорентабельным.

Однако, не все руды способны образовывать при окомковании прочные гранулы. Особенно часто это явление наблюдается для руд кор химического выветривания. Для обеспечения извлечения из них золота необходимо использовать специальные технологические приемы.

Для упорных первичных руд, в которых золото находится в тонковкрапленном состоянии в сульфидах, реже – в карбонатах и кварце, используются весьма жесткие методы вскрытия минералов –носителей золота. Такими методами могут быть пирометаллургические, термохимические, микробиологические и т.д.

Анализ научно-технической литературы показал, что волновые процессы могут быть использованы в целях направленного изменения структурных и технологических свойств золотосодержащего минерального сырья. Наиболее эффективным в этом отношении может быть наложение различных внешних силовых полей — ультразвукового, электромагнитного, сверхвысокочастотного и т. д.

Проведенные в ЦНИГРИ вместе со специалистами ряда организаций исследования показали принципиальную возможность использования энергетических обработок для изменения технологических свойств золото-

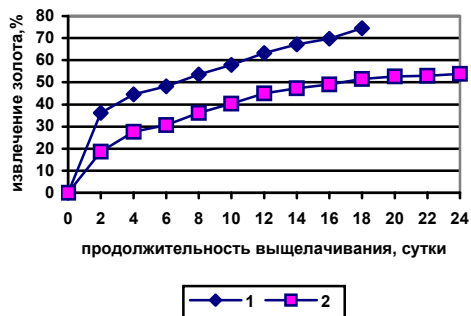


Рис. 1. Влияние озвучивания на извлечение золота в раствор из руды: 1 — с озвучиванием; 2 — без озвучивания

содержащих руд и продуктов их переработки.

Наиболее интересным представляется изучение влияния энергетических обработок на цианидное извлечение золота.

До настоящего времени в промышленности чаще других способов использовалось ультразвуковое воздействие.

Объектами исследований по оценке влияния ультразвуковой обработки на показатели цианидного извлечения золота являлись высокошламистая руда коры химического выветривания и упорный золотосодержащий сульфидный концентрат. Результаты выполненных исследований (рис. 1, 2) показали, что ультразвуковая обработка материала оказывает

Рис. 3. Влияние высокочастотной обработки на цианирование пиритного концентрата: 2 — после МИО; 3 — без МИО

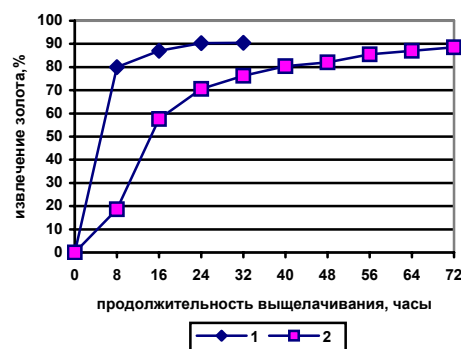
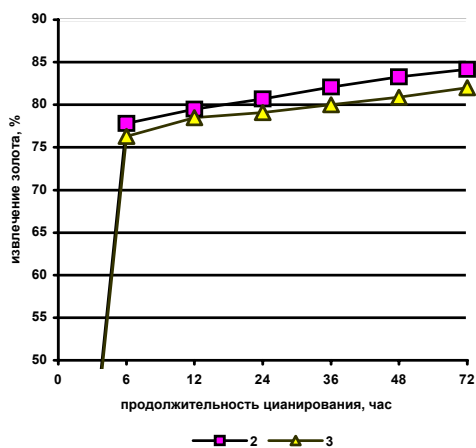


Рис. 2. Влияние озвучивания на извлечение золота в раствор из сульфидного концентрата: 1 — с озвучиванием; 2 — без озвучивания

положительное влияние на показатели последующего цианирования.

Вторым направлением работ были исследования по оценке возможности использования предварительной электромагнитной обработки различных диапазонов частот для вскрытия тонко вкрапленного золота (на примере пиритного концентрата). На рис. 3 приведены результаты цианирования концентрата после предварительной электромагнитной обработки в высокочастотном поле.

Исследовали также возможность использования СВЧ-обработки с целью повышения показателей извлечения золота из этого концентрата (рис.4).

Таким образом, проведенные исследования по оценке влияния электромагнитных обработок на цианидное извлечение золота из различного золотосодержащего сырья показатели принципиальную возможность использования их для повышения извлечения золота. Возможные механизмы влияния включают улучшение диффузионных процессов, дезинтеграцию

комплексов глинистых минералов, полную или частичную деструкцию минералов-носителей золота. Создание технологий на их основе поможет решить проблему переработки низкосортного и труднообогатимого золотосодержащего сырья экономически и экологически оправданными методами.

Коротко об авторах

Крылова Г.С. – кандидат химических наук, зав. лабораторией,
Ибрагимова Н.В. – вед. инженер,
ФГУП «ЦНИГРИ».



© Г.Е. Малофеев, И.Д. Чоловская,
2005

УДК 622.276.653

Г.Е. Малофеев, И.Д. Чоловская ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ТЕРМО- УПРУГОГО ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ

Семинар № 15

Рис. 4. Влияние СВЧ-обработки на цианидное извлечение золота из флотоконцентрата:

1 — СВЧ — 5 мин; 2 — СВЧ — 15 мин, 3 — без СВЧ обработки



На рис. 1 по данным работы [2] воспроизведена экспериментальная зависимость от критерия Фурье коэффициента теплоиспользования, равного отношению количества тепла, аккумулярованного в интервале приемистости, к общему его количеству, введенному в пласт. На рис. 1 обозначено:

$$F_0 = \lambda_{\text{п}} t / c_{\text{п}} \rho_{\text{п}} h^2; \text{Pe} = v_{\text{ж}} c_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} h / \lambda_{\text{п}};$$

где $\lambda_{\text{п}}$, $c_{\text{п}}$, $\rho_{\text{п}}$ – соответственно коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность пласта; $c_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{ж}}$ – удельная теплоемкость и плотность нагнетаемого рабочего агента; $v_{\text{ж}}$ – скорость фильтрации; h – толщина (интервал приемистости) пласта; t – время.

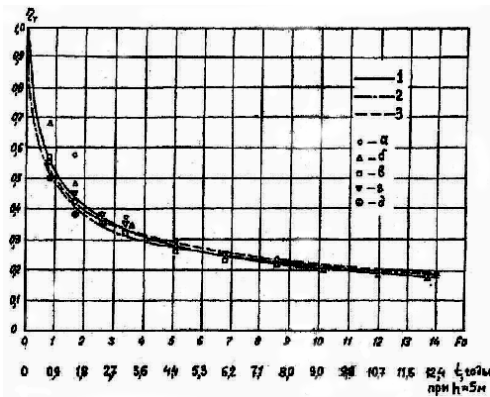


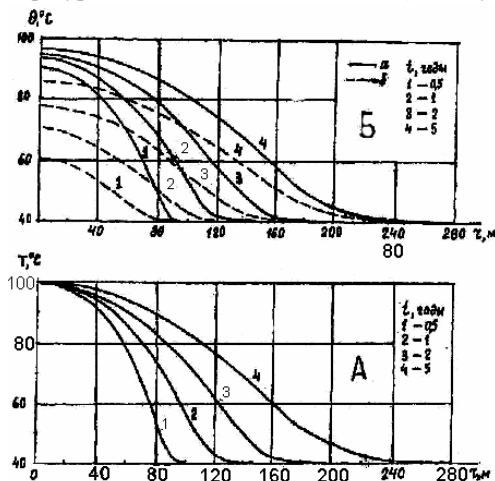
Рис. 1. Сопоставление экспериментальных значений коэффициента теплоиспользования (1) и рассчитанных по формулам Л.И. Рубинштейна (2) и Маркса-Лангеихейма (3): а-Рe=1,77; б-Рe=3,54; в-Рe=7,08; г-Рe=10,62; д-Рe=14,16

Эта экспериментальная зависимость хорошо согласуется с результатами теоретических исследований [3].

Из рис. 1 следует, что при продолжительном нагнетании рабочих агентов - теплоносителей (например, в течение одного года) «потери тепла» в окружающие породы могут достигать 50 %.

В связи с этим представляет значительный практический интерес проанализировать эффект (результат) такого теплопроводного прогрева нефтенасыщенных окружающих пород на разработку продуктивного пласта.

Для оценки температурного эффекта прогрева окружающих пород на рис. 2 приведены результаты расчета нагревания пласта (т.е. интервала приемистости рабочего агента) толщиной 5 м и окружающих пород (т.е. примыкающих сверху и снизу к интервалу приемистости) при нагнетании 500 м³/сут горячей воды с температурой $T_w = 1000$ °С. Начальная (невозму-



щенная) температура пласта принята 400 °С. Расчеты выполнены по математической модели Х.А Ловерье [3].

Как видно из рис. 2, температура окружающих пород в 1 м от кровли (интервала приемистости) по прошествии 5 лет сравнительно мало отличается от температуры самого пласта (интервала приемистости).

В качестве примера на рис. 3 приведены данные интервала приемистости, опубликованные в работе [4]. Поэтому часть продуктивного пласта толщиной 5 м выше интервала приемистости может содержать значительные запасы нефти. Температурное расширение содержащейся в этой части пласта жидкостей (нефти, воды) и минерального скелета приведет к увеличению объема насыщающей жидкости и снижению парового объема, что неизбежно приведет к термоупругому вытеснению из пласта жидкостей (нефти и воды).

Оценка эффекта термоупругого вытеснения нефти непосредственно из самого продуктивного пласта (т.е. интервала приемистости нагнетаемого рабочего агента) была выполнена в работе [5]. Было показано, что в рассмотренных в указанной работе условиях прирост нефтеотдачи может оказаться сравнимым с приростом нефтеотдачи за счет снижения вязкости нефти и температурного изменения относительных проницаемостей.

Ниже предлагается один из возможных подходов к оценке влияния на нефтеотдачу термического расширения пластовых жидкостей и минерального скелета в той части продуктивного пласта, которая не охвачена непосредственно нагнетаемым теплоносителем, но прогрета за счет теплопроводности.

В качестве исходного положения, как и в теории упругого режима [6], принимаем, что изменение плотности жидкости ρ и пористости пласта m подчиняется зависимости, аналогичной закону Гука:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \beta_{ж}^p dP - \beta_{ж}^T dT \quad (1)$$

$$\frac{dm}{m} = \beta_{\phi}^p dP - \beta_{\phi}^T dT \quad (2)$$

где $\beta_{ж}^p$, β_{ϕ}^p , $\beta_{ж}^T$, β_{ϕ}^T – соответствующие коэффициенты изменения объемов пластовой жидкости и пор пласта в зависимости от внутрипорового давления P и температуры T (рассматриваются как константы).

Интегрируя (1), (2) получаем

$$\rho = \rho_0 \exp [\beta_{ж}^p (P - P_0) - \beta_{ж}^T (T - T_0)] \quad (3)$$

$$m = m_0 \exp [\beta_{\phi}^p (P - P_0) - \beta_{\phi}^T (T - T_0)] \quad (4)$$

где ρ_0 , m_0 , P_0 , T_0 – значения соответствующих величин в начальном (исходном, невозмущенном) состоянии нефтепластовой системы.

Уравнение сохранения массы жидкости в порах рассматриваемого пласта (т.е. уравнение неразрывности) имеет вид:

$$\operatorname{div}(\rho \bar{V}) = -\frac{\partial}{\partial t}(m\rho) \quad (5)$$

Течение жидкостей в пласте будем считать подчиняющимся закону Дарси:

$$\bar{V} = -\frac{K}{\mu(T)} \operatorname{grad}(P) \quad (6)$$

Подставляя в (5) значения ρ , m , \bar{V} из (3), (4) и (6) получим уравнение неразрывности (5) в виде:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \left\{ \frac{1}{\mu(T)} \exp[\beta_{ж}^p (P - P_0) - \beta_{ж}^T (T - T_0)] \operatorname{grad}(P) \right\} = \\ = \frac{m_0}{K} \exp[(P - P_0)(\beta_{ж}^p + \beta_{\phi}^p) - (T - T_0)(\beta_{ж}^T + \beta_{\phi}^T)] \times \\ \times \left[(\beta_{ж}^p + \beta_{\phi}^p) \frac{\partial T}{\partial t} - (\beta_{ж}^T + \beta_{\phi}^T) \frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

Полученное выражение представляет собой основное дифференциальное уравнение движения упругой жидкости в упругой пористой

среде в неизотермических условиях (т.е. дифференциальное уравнение термоупругой фильтрации). Поскольку в этом уравнении две неизвестные величины (P и T), то его необходимо дополнить уравнением теплового баланса

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}T) - \frac{c_{жс} \rho_{жс}}{\lambda} \operatorname{div}(\bar{V}T) = \frac{c\rho}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

В этом уравнении скорость фильтрации рассматривается как известная функция от температуры и давления согласно закону Дарси (7).

Для приближенной количественной оценки эффекта термоупругого вытеснения (т.е. эффекта термоупругой фильтрации) рассмотрим упрощенную задачу: будем учитывать только термическое расширение пластовой жидкости, т.е. принимаем $m = \text{const}$.

Будем считать, что поры пласта заполнены только нефтью. В этом случае будем иметь

$$\frac{\partial \rho}{\rho} = -\beta_{ж}^T dT \quad (9)$$

$$\rho = \rho_0 \exp[-\beta_{ж}^T (T - T_0)] \quad (10)$$

Рассмотрим «идеализированный» случай, когда температура всего рассматриваемого участка пласта повышается равномерно, т.е. $T = T(t)$ и следовательно вязкость нефти можно рассматривать как однозначную функцию времени:

$$\mu = \mu(t)$$

При таких упрощениях уравнение сохранения массы нефти (5) в случае радиального течения принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial r}(q\rho) = -2\pi r h \frac{\partial}{\partial t}(m\rho) \quad (11)$$

где q – объемный расход нефти, определяемый согласно закону Дарси по формуле:

$$q = -\frac{K}{\mu t} 2\pi r h \frac{\partial P}{\partial r} \quad (12)$$

В соответствии с вышеуказанными упрощающими допущениями будем иметь

$$\frac{\partial m}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial \rho}{\partial r} = 0 \quad (13)$$

Тогда уравнение сохранения массы (11) с учетом (12) и (13) примет вид

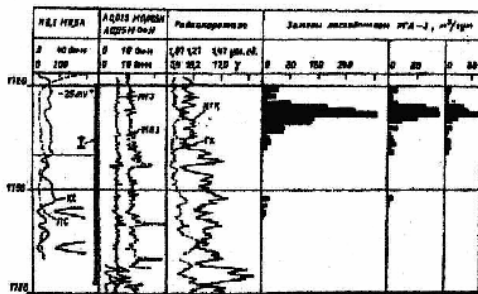


Рис. 2. Распределение температуры в пласте А и в окрестности скважины № 1 в пласте А и в окрестности скважины № 2 в пласте А (по данным измерений температуры в скважинах № 1 и № 2) [4]

$$\frac{K\rho}{\mu(t)} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) = m r \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (14)$$

После выполнения в этом уравнении операции дифференцирования с учетом (9) получим

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial r} + A(t) = 0 \quad (15)$$

$$\text{где } A(t) = \frac{m\mu(t)}{K} \beta_{ж}^T \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

Принимаем, что нагнетаемый рабочий агент не поступает в пласт выше и ниже интервала приемистости, а на добывающей галерее поддерживается постоянное давление Рзаб. Следовательно будем иметь:

$$r = r_c, \frac{\partial P}{\partial r} = 0; r = R, P = P_{заб} \quad (17)$$

Решение уравнения (15) при условиях (17) получаем в виде

$$P - P_{заб} = A(t) \left[\frac{(R^2 - r^2)}{4} + \frac{r_c^2}{2} \ln \frac{r}{R} \right] \quad (18)$$

Приток нефти q_n в круговую галерею радиусом R на основании вышеизложенного будет равен

$$q_n^T(t) = \pi m \beta_{ж}^T h (R^2 - r_c^2) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (19)$$

Накопленная добыча нефти за счет «термоупругой» фильтрации составит

$$Q_n^T(t) = \int_0^t q_n^T(t) dt = \pi m \beta_{ж}^T h (R^2 - r_c^2) [T(t) - T_0] \quad (20)$$

Принимаем $r_c \ll R$. Тогда «термоупругая» добыча нефти в расчете на 1 м толщины «непроницаемого» пласта составит

$$Q_n(t) = \pi m \beta_{ж}^T R^2 [T(t) - T_0] \quad (22)$$

Оценим количественно величину термоупругого вытеснения (притока) нефти при прогреве полностью нефтенасыщенного пласта от $T_0 = 30^\circ\text{C}$ до $T(t) = 130^\circ\text{C}$ при следующих исходных данных: $m = 0,10$; $R = 250$ м; $\beta_{ж}^T = 0,9 \cdot 10^{-3}$ 1/град [7].

После подстановки этих значений в (21) получим

$$Q_n(t) = \pi 0,1 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 250^2 (130 - 30) = 1767 \text{ м}^3$$

Начальное содержание нефти в рассматриваемом объеме было

$$Q_n^0 = \pi R^2 m = \pi 250^2 \cdot 0,1 = 19635 \text{ м}^3$$

Величина термоупругого вытеснения нефти составит

$$\Delta Q_n = 1767 : 19635 \approx 0,09, \text{ т.е. } 9\%.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малофеев Г.Е., Чоловская И.Д., Белянин А.А. О теплообмене пласта с окружающими породами при циклическом нагнетании в него рабочих агентов// Сб. научн. тр. ОАО РМНТК «Нефтеотдача» и ОАО «ВНИИнефть»-2002. - Вып.128. - С. 118-132.
2. Малофеев Г.Е. Потери тепла в кровлю и подошву при закачке в пласт горячей воды// Изв. ВУЗов Нефть и Газ. - 1959. - №5. - С. 37-43.
3. Шейнман А.Б., Малофеев Г.Е., Сергеев А.И. Воздействие на пласт теплом при добыче нефти-М.: Недра, 1969. - 256 с.
4. Габура В.Е. Геология и разработка нефтяных и газонефтяных месторождений -М.: ВНИИОЭНГ, 1995. - 496 с.
5. Боксерман А.А., Шалимов Б.В., Якуба С.И. О влиянии теплового расширения пластовой системы на нефтеотдачу при вытеснении нефти горячей водой// Сб. научн. трудов. ВНИИ. - 1973. - Вып.45. - С. 173-182.
6. Щелкачев В.Н. Основные уравнения движения упругой жидкости в упругой пористой среде// Доклады АН СССР.-1946.-Том 52. - №2. - С.103-105.
7. Перри Дж. Г. Справочник инженера-химика в 2 т. Пер. с англ.-Л.: Химия, 1969.-Т.1.- 640 с.

Коротко об авторах

Малофеев Г.Е. – доктор технических наук, ОАО «РМНТК» Нефтеотдача.
Чоловская И.Д. – кандидат технических наук, ОАО «РМНТК» Нефтеотдача».



