
© Н.Г. Малухин, В.П. Дробаденко,
Г.Н. Малухин, А.Л. Вильмис,
2008

УДК 622.648:532.542.7

**Н.Г. Малухин, В.П. Дробаденко,
Г.Н. Малухин, А.Л. Вильмис**

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ, И МЕТОДОВ РАСЧЕТА
СКВАЖИННОЙ ГИДРОТЕХНОЛОГИИ
И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Разработана базовая физико-аналитическая модель процесса эрлифтования твердых отложений с глубиной их залегания до 2000 м. Обосновано применение технологии СГТ, которая прошла опытно промышленные испытания в 2007 г.

Семинар № 17

Развитие гидродобывающей отрасли страны сопровождается совершенствованием способов и схем отработки, технологий интенсификации процессов добычи, обогащения и переработки с целью повышения степени извлечения полезных ископаемых из недр. В условиях перехода страны на рыночные отношения и выступающих на передний план эколого-социально-экономических требований к производству – научное обоснование и широкое внедрение прогрессивных методов добычи через специально оборудованные эксплуатационные скважины с использованием потенциальных газожидкостных энергоносителей представляет важную государственную задачу.

Несмотря на то, что скважинная гидротехнология (СГТ) уже вышла из эпохи горного искусства и заняла место в инженерной науке, в практике планирования и проектирования горно-добывающих предприятий, использование теоретических разработок, составляющих гидротехнологические процессы до сих пор не стало правилом.

На этом фоне особенно четко обозначилась необходимость дальнейшего развития теории, методов расчета взаимосвязанных процессов СГТ. Вместе с тем многие, принятые еще в 30-50 х годах научные концепции сходных процессов и явлений, сопровождающих СГТ, усовершенствуются, как правило, лишь уточнением эмпирических коэффициентов известных зависимостей, что и предопределяет соответствующую степень развития СГТ на базе эмпирических закономерностей.

Скважинная гидротехнология характеризуется высокой специализацией составляющих ее процессов и, одновременно, теснейшим их взаимодействием. Вопросы надежности СГТ, ее научное обоснование имеют определяющее значение, ввиду отсутствия визуального контроля очистных работ и поэтому для эффективного управления непрерывным технологическим процессом необходимо

димы четкие научно-обоснованные технические и технологические рекомендации, опробованные опытом.

Большинство научно-исследовательских работ по СГТ посвящено сравнительно узким вопросам технологии СГТ. Можно утверждать, что теория процессов СГТ находится в настоящее время в ранней стадии своего развития и имеет все недостатки, свойственные этой стадии. Главный из них – отсутствие системы физически обоснованных понятий, в качестве которых используются утверждения, не имеющих экспериментального подтверждения. Примером этого может служить широко распространенное мнение об определяющей роли величины затопления на степень напорности гидроэлеватора в процессе подъема гидросмеси, величины начального участка струи в процессе струеформирования, скорости перемещения струи по забою в процессе гидроразмыва, глубина потока при самотечном гидротранспортировании. Взаимосвязь разрушающих скоростей фильтрации в процессе пульпоприготовления и возникших при этом гидравлических сопротивлений порового слоя с учетом гидравлической крупности всасываемого твердого. Фундаментальные исследования движения газожидкостных смесей по вертикальным трубам справедливы только для условий маломасштабных искомых потоков, где различные области существования известных форм движения газожидкостной смеси соизмеримы как по времени, так и по длине перемещения, чего нет в реальных потоках подъемной трубы эрлифта, где различные области существования известных форм движения газожидкостной смеси соизмеримы как по времени, так и по длине перемещения, чего нет в реальных потоках подъемной трубы эрлифта, определяющей формой существования газожидкостной смеси является снарядная. Критериальные коэффициенты моделирования потоков (Фруда, Рейнольдса) при работе эрлифта в условиях СГД должны учитывать не менее двух геометрических параметров (диаметр трубы и ее длину), которые неоднозначно влияют на производительность эрлифтного подъема и как определяющим критерием подобия существовать не могут при ведении очистных работ на глубинах свыше 100 метров, где масштабный фактор является одним из определяющих производительность эрлифта.

Скважинная гидротехнология включает ряд основных технологических процессов: бурение и обустройство гидротехнологических скважин, гидроразмыв, гидротранспортирование (как правило, безнапорное) на почве очистной камеры; зумпфовое пульпоприготовление и всасывание, гидроподъем, напорный поверхностный гидротранспорт (с одновременным сгущением гидросмеси или без), а также управление устойчивостью кровли. Сложности взаимоувязки названных технологических процессов заключается в том, что если эффективность гидроразмыва определяется конструктивными параметрами ствола и насадки, качеством струи жидкости, то для управления процессом безнапорного гидротранспорта необходимы иные технологические критерии: состояние и форма почвы очистной камеры, наличие и параметры заходок как по технологическому фактору так и по критерию устойчивости кровли, крупность перемещаемого твердого, глубина отработки, конструктивные параметры зумпфа и эксплуатационной скважины. Энергоноситель – жидкость в процессе гидроразмыва формируется как инструмент разрушения, эффективность использо-

вания которого определяется компактностью, качеством, дальнобойностью распространения струи. При гидротранспортировании, энергетический агент определяет технологическую возможность перемещения (доставки) твердого по почве и во взвеси посредством конструктивных особенностей очистной Камеры, распространяемых расходом гидросмеси и скоростью потока, параметрами зумфра подъемного аппарата, способом и производительность гидроподъема. Выделение процесса всасывания и пульповприготовления, как связующего звена гидротранспорта и гидроподъема, определено своими специфическими особенностями: конструктивные параметры тракта всасывания, характеристика зумфовой части сектора размыва, ко гидросмеси, гранулометрический состав переменного твердого. В свою очередь степень гидроразрушаемости продуктивного массива определяет не только возможную производительность по твердому, но и принципиальную технологическую схему ведения очистных работ (затопленным или осущенным забоем), что непосредственно связано с выбором соответствующей технологической схемы гидроподъема. Реальность применяемой модели гидроэлеваторного подъема определяется степенью информированности о технологических и технических возможностях эффективного взаимодействия со сменными процессами СГТ. Так, в условиях больших водопритоков предусматривается ведение очистных работ в затопленных камерах двухфазными гидромониторными струями, с одной стороны, и эрлифтную схему подъема – с другой. Степень технической оснащенности участка СГТ предполагает использование различных вариантов гидроподъема – комбинированный гидроэлеваторно-эрлифтный подъем, либо эрлифтный с длинной всасывающей линией.

Выявление реальной структуры процессов СГТ позволяет правильно оценить границы ее применимости. С этой точки зрения остаются эффективными и надежными методы аналитического прогнозирования техники и технологии составляющих СГТ процессов. Возможность прогнозирования технологических процессов СГТ позволяет составить качественное и количественное представление о реальном использовании этого метода разработки в различных горногеологических условиях эксплуатации месторождений скважинной гидротехнологии.

Анализ экспериментальных и аналитических исследований показывает, что технология гидротранспортирования пульпы по почве сектора размыва должна обеспечивать предупреждения состояния опрокидывания потока, периодически перемещая процесс гидроразмыва в смежные заходки с учетом кратковременности обнажения кровли очистной камеры. При этом удельная транспортирующая способность потока определяется по выражению

$$E = \frac{1}{1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_T}} \left(\frac{i - f_{ж}}{f_T - i} \right), \quad (1)$$

где E – удельная транспортирующая способность потока, $\text{т}/\text{м}^3$; $\rho_{ж}, \rho_T$ – соответственно плотность жидкости (воды) и твердого, $\text{кг}/\text{м}^3$; $f_{ж}, f_T$ – соответст-

но, коэффициент трения о почву очистной камеры несущей среды и твердого; i – уклон почвы очистной камеры.

Гидроподъем является одним из основных технологических процессов СГТ. От его технологических возможностей и надежности зависит диапазон решаемых СГТ проблем.

Одним из видов гидроподъема при СГТ является струйный – гидроэлеваторами, используемый при отработке продуктивных массивов с глубиной залегания до 150 м без значительных водопритоков. Хотя для других целей, струйные аппараты могут быть использованы с высотой гидроподъема и свыше 1000 м (например, при чистке песчаных пробок в нефтяных скважинах). При этом диаметр чистки поднимаемого песка не превышает 2÷3 мм.

Эффективность использования гидроэлеваторного подъема оценивается, во-первых как аппарат и, во-вторых, всей гидроподъемной установки в целом. На основе энергетического баланса сил, имеющих место в проточной части гидроэлеватора, разработана физико-аналитическая модель процесса подъема гидросмеси:

- гидроэлеватором, как аппаратом

$$\beta = \frac{\left[\frac{2}{m} + \frac{2\alpha^2}{m(m-1)} \frac{\rho_1}{\rho_0} - \frac{(1+\alpha)(1+\alpha \frac{\rho_1}{\rho_0})}{m^2} (1 + \zeta_{cm} + \zeta_g) \right] - \left[(1 + \zeta_{sc})(\frac{\alpha}{m-1})^2 \frac{\rho_1}{p_0} \right]}{(1 + \zeta_h) - (1 + \zeta_{sc})(\frac{\alpha}{m-1})^2 \frac{\rho_1}{\rho_0}} \quad (2)$$

- гидроподъемной установкой

$$\beta = \frac{\left[\frac{2}{m} + \frac{2\alpha^2}{m(m-1)} \frac{\rho_1}{\rho_0} - \frac{(1+\alpha)(1+\alpha \frac{\rho_1}{\rho_0})}{m^2} (1 + \zeta_{cm} + \zeta_g) \right] - \left[(1 + \zeta_{sc})(\frac{\alpha}{m-1})^2 \frac{\rho_1}{p_0} \right]}{(1 + \zeta_h) - \left[\frac{2}{m} + \frac{2 \cdot \alpha^2}{m(m-1)} \frac{\rho_1}{\rho_0} - \frac{(1+\alpha)(1+\frac{\rho_1}{\rho_0})}{m^2} (1 + \zeta_{cm} + \zeta_g) \right]} \quad (3)$$

где α , β – соответственно коэффициенты эжекции относительного напора; m – основной геометрический параметр гидроэлеватора; ρ_1 ρ_0 – соответственно, плотность эжектируемой гидросмеси и воды, кг/м³; ζ_h , ζ_{sc} , ζ_{cm} , ζ_g – соответственно, коэффициенты потерь в рабочей насадке, при всасывании, камере смешения и диффузоре.

Безразмерная опытная характеристика гидроэлеватора представлена линейной зависимостью и на рабочем участке достаточно удовлетворительно описывается уравнениями (2) и (3). С учетом этого обстоятельства определены

единственные оптимальные значения режимных параметров гидроподъема для каждого типа размерного ряда;

а) гидроэлеватором как аппаратом

- коэффициент эжекции

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{m}{2(1 + \zeta_{cm} + \zeta_g)}} - 0,5 \quad (4)$$

- относительный коэффициент напора

$$\beta_{opt} = \frac{1}{1 + \zeta_H} \left(\frac{1}{m} - \frac{1 + \zeta_{cm} + \zeta_g}{2m^2} \right) \quad (5)$$

б) гидроэлеватором, как гидроподъемной установкой

- коэффициент эжекции

$$\alpha_{opt} = 0,5 \left[\sqrt{\left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{1 - (1 + \zeta_{cm}) \cdot \zeta_g} - 1\right) \frac{\rho_1}{\rho_0}} - \frac{\left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_0}\right)}{2} \right] \quad (6)$$

- относительный коэффициент напора

$$\beta_{opt} = \frac{1}{(1 + \zeta_H) - 2\left(\frac{1}{m} - \frac{1 + \zeta_{cm} + \zeta_g}{2m^2}\right)} \left(\frac{1}{m} - \frac{1 + \zeta_{cm} + \zeta_g}{2m^2} \right) \quad (7)$$

Существование оптимального коэффициента напора определяет физическую сущность процесса эжектирования как результата действия объемных сил по вытеснению гидросмеси из камеры. Смещение поршневым жидкостным образованием рабочей струи гидроэлеватора, что в динамике развития создает максимально возможное разрежение, соответствующее предкавитационному и описывается аналитически с учетом потерь в линии всасывания и физических характеристик эжектируемой гидросмеси.

Использование скважинной гидрогеотехнологии на глубокозалегающих (до 1500-2000 м) континентальных и шельфовых отложений, необходимость отработки которых может диктоваться дефицитом полезного ископаемого особого качества, в настоящее время из-за отсутствия мощных поверхностных компрессоров и насосов пока в широком диапазоне не рассматривается. Вместе с тем, в таких условиях эта проблема может найти решение при использовании эрлифта с длинной всасывающей линией.

Таким образом, необходимость отработки глубокозалегающих продуктивных отложений, а также участков с содержанием полезных компонентов с относительно большой объемной массой (где основные потери напора приходятся на поддержание твердого во взвеси и на трение), требует оценки энергетического баланса гидроподъема на основе истинной гидродинамической ситуации по эксплуатационной скважине, а не расходным параметрам потока на выходе из скважины

- истиной концентрации воздуха в нагнетательной линии эрлифта

$$(S_r)_u = \frac{V_r(x)}{1,2(Q_{\text{ж}} + V_r(x)) + Q_2} \quad (8)$$

- истиной концентрации твердого

$$(S_{\text{тв}})_u = \left(\frac{1}{Q_{\text{ж}} - v_{cT} w_{bc}} \right) \left(1 - \frac{V_r(x)}{1,2(Q_n + V_r(x)) + Q_2} \right) \quad (9)$$

- истиной концентрации жидкости

$$(S_{\text{ж}})_u = 1 - \left[\left(\frac{Q_{\text{тв}}}{Q_{\text{ж}} - v_{cT} w_{bc}} \right) \left(1 - \frac{V_r(x)}{1,2(Q_n + V_r(x)) + Q_2} \right) - \frac{V_r(x)}{1,2(Q_n + V_r(x)) + Q_2} \right] \quad (10)$$

где $(S_r)_u, (S_{\text{тв}})_u, (S_{\text{ж}})_u$ – истинные концентрации газа, твердого и жидкости; $Q_{\text{тв}}$, Q_n , $V_r(x)$ – соответственно расход твердого, гидросмеси и текущий расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; v_{cT} – гидравлическая крупность при степенном падении твердого, $\text{м}/\text{с}$; w_{bc} – площадь поперечного сечения всасывающей линии, м^2 ; Q_m – производительность эрлифта по жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_2 – расход обратного потока, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Используя истинные концентрации фаз, и с учетом анализа баланса давлений на границе раздела двух и трехфазного потоков, разработана базовая физико-аналитическая модель процесса эрлифтования твердых отложений с глубиной их залегания до 2000 м.

$$H = \frac{\left[h_H \left(N + \frac{h_H + h_{bc}}{h_H} \frac{\rho_T}{\rho_0} \right) \right] - \left[(h_{bc} + (1 + \lambda_n \frac{h_{bc}}{D} + \xi_{bc}) \frac{v_{bc}^2}{2g}) \right]}{\left[1 - BN_1 \cdot l_n \left(1 + \frac{1}{N(1+1.2B)} \right) \right] + \left[\frac{\lambda_{cm}}{2gD} \left(\frac{1.1 \cdot Q_n + \frac{Q_2^2}{2}}{w} \right)^2 \right] \left(1 + BNl_n \left(1 + \frac{1}{N(1+1.2B)} \right) \right)} \quad (11)$$

где H – высота движения трехфазного потока, м; h_H , D – соответственно длина и диаметр нагнетательной линии эрлифта, м; λ_n , λ_{cm} – соответственно, коэффициенты гидравлического сопротивления трубопровода при движении двух и трех разного потока; ξ_{bc} – коэффициент гидравлического сопротивления всасывающего устройства; N – относительный напорный параметр эрлифта.

Расходно-напорные характеристики гидродобычного агрегата тесным образом связаны с правильной оценкой возможностей поверхностного напорного гидротранспортирования. Существует множество методик расчета критических скоростей и удельных потерь напора по длине трассы гидротранспортирования гидросмесей различного гранулометрического состава. Анализ результатов расчета критических скоростей и удельных потерь напора показывает, что численные значения этих параметров по различным методикам отличаются на порядок и более. Физико-аналитическое обоснование критических скоростей потока гидросмеси и удельных потерь напора показывает, что структура искомых выражений должна иметь следующий вид:

- для критических скоростей потока гидросмеси

$$U_{kp} = A \cdot \left(\frac{d_T}{D} \right)^{\frac{1}{3}} [(1-S)^n \cdot S]^{1/6} \cdot \left(\frac{U_{cs}}{\sqrt{\frac{4}{3} agd_T}} \right)^{1/6} \sqrt{2gDa} \quad (12)$$

- для удельных потерь напора

$$\Delta i = B \cdot a \left(\frac{D}{d_T} \right)^{1/2} [(1-S)^n \cdot S]^{1.5} \left(\frac{U_{cs}}{U} \right)^{1.5} \quad (13)$$

где d_T, D – соответственно диаметр твердого и трубопровода, м; S – концентрация твердого в объеме гидросмеси; U_{cs} – скорость свободного падения среднезвешенного твердого мелкодисперсных фракций (имеющих сальдирующее (скачкообразное) перемещение по дну трубопровода), м/сФ; U – рабочая скорость гидросмеси м/с; a – относительный объемный вес твердого в несущей среде (в воде или пульпе тончайших фракций); A и B – опытные коэффициенты; $\left(\frac{d_T}{D} \right)$ – относительный масштабный фактор перемещаемого твердого; $(1-S)^n \cdot S$ – оценивает оптимум объемной концентрации твердого при гидротранспортировании; $\left(\frac{U_{cs}}{\sqrt{\frac{4}{3} agd_T}} \right)$ – определяет коэффициент лобового сопротивления

(при диаметре твердого $d_T > 2 \div 3$, движение жидкости переходит от скачкообразного в донное, и удельные потери напора составляются независимые от диаметра твердого, что и подтверждается опытом).

Таким образом, для расчета критических скоростей потока гидросмеси можно использовать выражение Н.А. Силина и А.Е. Смолдырева (с введением ряда корректирующих коэффициентов), а для расчета удельных потерь напора – выражения R. Durand, B. Condolos, A. E. Смолдырев (также с вводом корректирующих коэффициентов).

Предлагаемые расчетные выражения (11) были успешно использованы при шельфовой отработки алмазосодержащих донных отложений у берегов ЮАР и Намибии в 2004-2005 г. По выражениям (1), (11), (12) и (13) была обоснована технология СГТ Тарской ильменит-циркониевой россыпи, которая успешно прошла опытно промышленные испытания в 2007 г. ГИАБ

Коротко об авторах

Малухин Н.Г. – профессор, доктор технических наук,
Дробаденко В.П. – профессор, доктор технических наук,
Малухин Г.Н. – ст. научный сотрудник,
Вильмис А.Л. – ст. научный сотрудник,
Российский государственный геологоразведочный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 17 симпозиума «Неделя горняка-2008». Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Ж. Аренс.

