

ХАЛИМОВ Илхом Убайдуллоевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СКВАЖИННОГО
ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧЫВАНИЯ НА ОСНОВЕ РАЗВИТИЯ
ПРОЦЕССА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА**

АВТОРЕФЕРАТ

**Специальность 25.00.22 – «Геотехнология
(подземная, открытая и строительная)»**

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе" МГГРИ-РГГРУ

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор

Малухин Николай Григорьевич

Официальные оппоненты:

Доктор геолого-минералогических наук, профессор, ученый секретарь
ОАО «ВНИПИпромтехнология»

Камнев Евгений Николаевич

Кандидат технических наук, ведущий инженер
Государственное бюджетное общеобразовательное учреждение, г. Москва, школа №2065 «Вектор»

Тимошенко Сергей Владимирович

Ведущая организация:

ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья (ВИМС)

Защита состоится **"3" июня 2014 года в 15 ч. 00 мин.** На заседании диссертационного совета Д 212.121.08 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования **"Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе" (МГРИ-РГГРУ)** по адресу: **117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, МГРИ-РГГРУ, ауд. 4-73.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.

Автореферат разослан " " 2014г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Холобаев Е.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. С 1994 года и по настоящее время вся добыча урана в НГМК Республики Узбекистан осуществляется только способом подземного выщелачивания через системы геотехнологических скважин. Разрабатываемые урановые руды характеризуются низким качеством и крайне сложными горнотехническими и гидрогеологическими условиями залегания, полностью исключающими их отработку традиционными горными способами.

При СПВ прифильтровые зоны технологических скважин подвержены механической и химической кольматации особенно в закачных скважинах. Это неизбежные явления существенно снижает производительность скважин и, следовательно, увеличивают сроки эксплуатации участков, блоков и месторождения в целом. При достаточной простоте физических процессов, повышение гидравлического сопротивления массива в прифильтровой зоне, их аналитическое описание, необходимое для проектирования технологических систем СПВ в настоящее время отсутствует. В этой связи предлагаются некоторые аналитические решения для описания процесса фильтрации при так называемом гидравлическом разрыве пласта.

Анализ опытов по разрыву искусственных и естественных образцов показал: давление разрыва образцов почти во всех случаях больше показателя, вычисленного по любой теории прочности; чем больше проникновение жидкости в образец, тем меньше давления разрыва.

Наиболее эффективно осуществлять напорную подачу в скважину крупного зернового материала для расклинивания трещин гидроразрыва, с использованием водоструйных аппаратов – гидроэлеваторов.

Водоструйный аппарат не имеет движущих механических частей, подает в напорный трубопровод достаточно крупный материал и способен создавать в напорном транспортном трубопроводе необходимые напоры (давление) для создания условий гидроразрыва продуктивного пласта и надежного закрепления (расклинки) образовавшихся трещин. В связи со сложным специфическим для данной технологии способом закрепления трещин твердым материалом, выявилась необходимость в многофакторном анализе эксплуатационных возможностей такой технологической схемы гидроразрыва пласта с использованием водоструйных аппаратов.

Использование водоструйного аппарата в настоящей работе, является, актуальным для совершенствования технологии СПВ на основе развития процесса гидравлического разрыва пласта.

Цель работы- исследование процесса гидравлического разрыва пласта в технологии подземного выщелачивания.

Идея работы- использования водоструйных аппаратов для закрепления трещин при гидравлическом разрыве пласта.

Задачи исследований:

- обоснование времени отработки гидродинамической ячейки с учетом удельного расхода рабочего реагента и длины протяженного коллектора;
- обоснование содержания полезного компонента в продуктивных растворах с увеличением длины коллектора;

- оценка влияния протяженных коллекторов на интенсивность движения жидкости при работе гидродинамической ячейки;
- выявление оптимальной работы водоструйного аппарата в процессе гидроразрыва пласта и закрепление образовавшихся трещин песком;
- аналитическое выявление координат, оптимальной работы водоструйного аппарата при гидроразрыве пласта и достижимый при этом коэффициент полезного действия.

Методы исследований:

- анализ и обобщения практического опыта и литературных данных по гидравлическому разрыву пласта, в том числе при нефтедобычи;
- обобщение и обработка материалов, полученных в полевых условиях работающего предприятия подземного скважинного выщелачивания НГМК;
- аналитическое обоснование оптимальной работы водоструйных аппаратов, используемых при гидроразрыве пласта.

Основные защищаемые научные положения

1. Процесс закачки фильтрующего материала в трещину должен моделироваться с использованием параметров перемещения гетерогенной двухфазной смеси или гомогенной суспензии в канале, что естественнее описывать этот процесс континуальной теории механики сплошных сред с учетом того, что характерный размер частиц твердой фазы в смеси много больше молекулярно-кинетических параметров (расстояний между молекулами жидкой фазы и средних длин свободного пробега молекул) и значительно меньше расстояний, при которых существенно изменяются макроскопические осредненные параметры твердого, составляющего искомую смесь.

2. Максимальный коэффициент полезного действия водоструйного аппарата должен оцениваться при кавитационном режиме его работы для выявления оптимальных параметров относительного коэффициента напора нагнетания и коэффициента эжекции с учетом значения основного геометрического параметра.

3. Оптимальные расходно-напорные возможности водоструйного аппарата в технологии ГРП могут быть определены при коэффициенте полезного действия, не превышающем 26,7%.

Научная новизна работы

1. Время отработки единичной гидродинамической ячейки пропорционально связанной с ним показателем удельного расхода рабочего реагента и с увеличением длины протяженного коллектора сокращается.

2. Среднее содержание полезного компонента в продуктивных растворах имеет обратно-пропорциональную зависимость при значительном увеличении длины коллектора.

3. Относительные колебания геотехнологических показателей при изменении длины протяженных коллекторов незначительны для всех искоемых показателей при сохранении общей направленности.

4. В результате влияния протяженных коллекторов на пласт происходит перераспределение интенсивности проработки каждой ячейки, когда средние и периферийные зоны прорабатываются более интенсивно, чем центральные.

5. Аналитически выявлено существование максимального коэффициента полезного действия (кпд) для каждого типоразмерного ряда водоструйного аппарата.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы основаны на использовании научных методов исследований, включающих анализ и обобщения теоретических и экспериментальных работ, проведение полевых исследований и их сходимость с расчетными и практическими данными.

Практическая ценность работы заключается в оценке эффективного процесса гидравлического разрыва пласта при использовании водоструйных аппаратов в целях повышения приемистости технологических скважин при скважинном выщелачивании.

Реализация результатов работы. Разработанные технологические решения, предложения и рекомендации используются проектной организацией Навоийского горно-металлургического комбината при проектировании гидравлического гидроразрыва пласта на месторождений республики Узбекистана.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований докладывались на международных научно-практических конференциях «Наука и новейшие технологии при поисках, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых (Москва, РГГРУ, 2010, 2012, 2013 гг.) и в двух изданиях из списка ВАКа

Публикация. Основные результаты исследований и научные положения опубликованы в 5 научных работах. В том числе в 2-х изданиях, рекомендованных ВАК России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения; изложена на 92 странице компьютерного текста, списка использованных источников из 103 наименования, содержит 15 рисунка

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

При СПВ прифильтровые зоны технологических скважин подвержены механической и химической коагуляции особенно в закачных скважинах. Это неизбежное явление существенно снижает производительность скважин, следовательно, увеличивает срок эксплуатации участков, блоков и месторождения в целом. При достаточной простоте физических процессов повышения гидравлического сопротивления массива в прифильтровой зоне их аналитическое описание, необходимое для проектирования технологических систем СПВ в настоящее время отсутствует. В этой связи предлагаются некоторые аналитические решения для описания процесса фильтрации при так называемом «скин-эффекте». По нашему мнению достаточно сложно правильно оценивать производительность скважины с учетом уменьшения фильтрационного сопротивления прифильтровой зоны при проведении гидроразрыва пласта.

Решению вопросов по совершенствованию технологии СПВ на основе развития процесса гидравлического разрыва пласта за последние десятилетия посвящены работы многих ученых, исследователей- В.П. Дробаденко, Н.Г. Малухина, С.В. Маркелова, В.П. Неберы, В.Г. Язикова, А.С. Хрулева, В.Н. Сытенкова, Ю.Н. Васильева, А.М. Изюмовой, сотрудника НГМК Норова Ю. Д.

Непосредственно проведение гидравлического разрыва пласта ведется по трем технологических схемам:

- однократный гидроразрыв пласта, когда воздействию закачиваемой жидкости гидроразрыва подвергаются все пласты или пропластки, эксплуатируемые скважиной;
- многократный гидроразрыв пласта, когда последовательно гидроразрыву подвергаются два или более пластов или пропластков, вскрытых скважиной;
- поинтервальный (направленный) гидроразрыв пласта, когда гидроразрыву преднамеренно подвергается один заранее определенный пласт или пропласток из вскрытых скважин.

Сущность гидравлического разрыва пласта (ГРП) состоит в том, что посредством закачки жидкости при высоком давлении происходит раскрытие естественных или образование искусственных трещин в продуктивном пласте и при дальнейшей закачке песчано- жидкостной смеси или кислотного раствора, расклинивание образованных трещин с сохранением их высокой пропускной способности после окончания процесса и снятия избыточного давления.

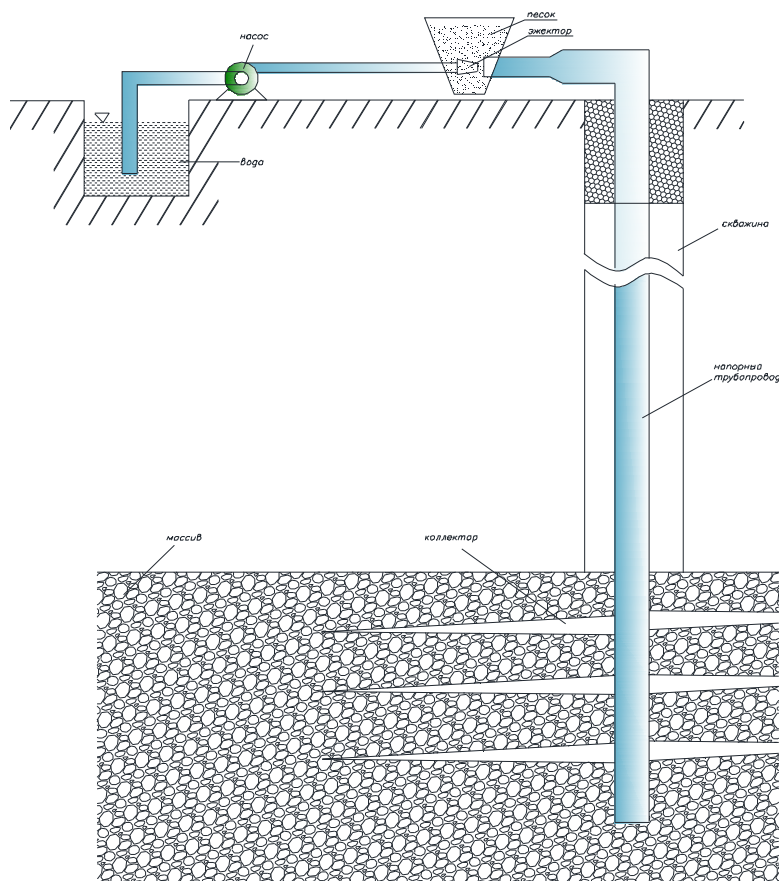


Рис.1 Схема использования водоструйного аппарата в технологии гидроразрыва пласта (ГРП)

Первое защищаемое научное положение

Процесс закачки фильтрующего материала в трещину должен моделироваться с использованием параметров перемещения гетерогенной двухфазной смеси или гомогенной суспензии в канале, что естественнее описывать этот процесс континуальной теории механики сплошных сред с учетом того, что характерный размер частиц твердой фазы в смеси много больше молекулярно- кинетических параметров (расстояний между

молекулами жидкой фазы и средних длин свободного пробега молекул) и значительно меньше расстояний, при которых существенно изменяются макроскопические осреднённые параметры твердого, составляющего искомую смесь.

Время распространения растворов по поровому пространству пласта является важнейшим геотехнологическим показателем, характеризующим закисление и проработку продуктивного горизонта. В любой ячейки пласта раствор движется с максимальными скоростями по кратчайшим лентам тока между технологическими скважинами, что происходит под влиянием действующих в этом направлении наибольших градиентов напора.

Удаленность рабочих частей скважин от границ пласта (ячейки) и связанное с ним растекание растворов приводит к их разубоживанию, неравномерной проработке пласта и образованию так называемых застойных зон, движения в которых почти не происходит, что исключает такие зоны из сферы эксплуатации.

В то же время идеальные по размерам (длине и ширине) и проницаемости коллекторные полости не могут быть созданы практически. В реальных условиях всегда будут иметь место непредсказуемые отклонения проектных параметров протяженных коллекторов, обусловленные невыдержанностью их размеров и невозможностью добиться равномерной проницаемости.

В процессе моделирования изучалась структура подземных растворов, формирующихся при искусственно созданных трещинах.

Время продвижения растворов между технологическими скважинами рассчитывалось конечно-разностным методом с помощью известной зависимости по основным лентам тока, выделенных на гидродинамических сетках с учетом самораспределения расхода по длине протяженного коллектора

$$t_i = \frac{\Pi_{эф}}{K} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l_i^2}{\Delta U_i} \quad (1)$$

где $\Pi_{эф}$ – эффективная пористость пластов доли единицы, принятая равной 0,2;

K – коэффициент фильтрации, м/сут.;

Δl_i – расстояние между соседними эквипотенциалами данной ленты тока, м.;

ΔU_i – разность потенциалов на участке ленты тока длиной Δl_i , м;

Для расчетов геотехнологических показателей было принято равномерное распределение запасов полезного компонента в полуячейке. При заданном их количестве и полноте извлечения 80% число геотехнологических циклов (N) составит 8.

Таким образом, время отработки полуячейки для 80% извлечения ее запасов определим по формуле:

$$T_{80\%} = Nt \quad (2)$$

где N – число геотехнологических циклов;

t – время отработки полуячейки, сут.

Расчет удельного расхода реагента на единицу массы извлекаемого компонента осуществляется по формуле:

$$K = \frac{Q \cdot T_{80\%} \cdot \bar{c}}{P_{80\%}}, \quad (3)$$

где \bar{c} – средняя концентрация реагента, 10 г/л.

Q – расход технологической скважины, поступающий в полуячейку 50 м³/сут.

$P_{80\%}$ – извлекаемые запасы ячейки.

$T_{80\%}$. – время отработки полуячейки для 80% извлечения

Среднее содержание полезного компонента в продуктивных растворах определяется по формуле

$$\bar{c} = \frac{P_{80\%}}{Q \cdot T_{80\%}} \quad (4)$$

Оптимальный случай – совершенные галереи, соединяющие скважины в откачных рядах – технически невозможны. Поэтому протяженные коллектора позволяют приблизить в известной степени, решение задачи равномерной отработки пластовых залежей.

В связи с некоторыми условно принятыми исходными показателями ($P_{80\%}$ - 400 м, N - 8, \bar{c} - 10 г/л), сравнительную оценку полученных зависимостей удобнее выполнить в относительных единицах, приняв за основу показатели начального варианта.

Построенные по результатам моделирования и расчетам графики зависимости основных геотехнологических показателей от длины и проницаемости протяженных коллекторов показывают следующую направленность их изменений (рис. 2-5)

1. Время отработки единичной гидродинамической ячейки пропорционально связанному с ним показателем удельного расхода рабочего реагента и с увеличением длины протяженного коллектора сокращается (рис.2) на 18 – 25,5% (при проницаемости коллектора 144 м/сут.) и на 22,4-27% (при проницаемости 280 м/сут.). При этом сравнение рассматриваемых показателей для различной протяженности коллектора (от 20 до 100%) выявляет весьма незначительное их сокращение; в пределах 2-8%

Эти же показатели с увеличением проницаемости коллекторов от начального варианта (8м/сут) до 280 м/сут сокращаются соответственно (рис.4) на 18-22,4% (для протяженности 20%), на 24,2 – 26% (для протяженности 46%) и на 25,5-27% (для протяженности 100%).

Сравнение показателей времени отработки и расхода реагента для проницаемости 144 и 280 м/сут. показывает столь же незначительное сокращение (всего на 2,6 – 6,5%) .

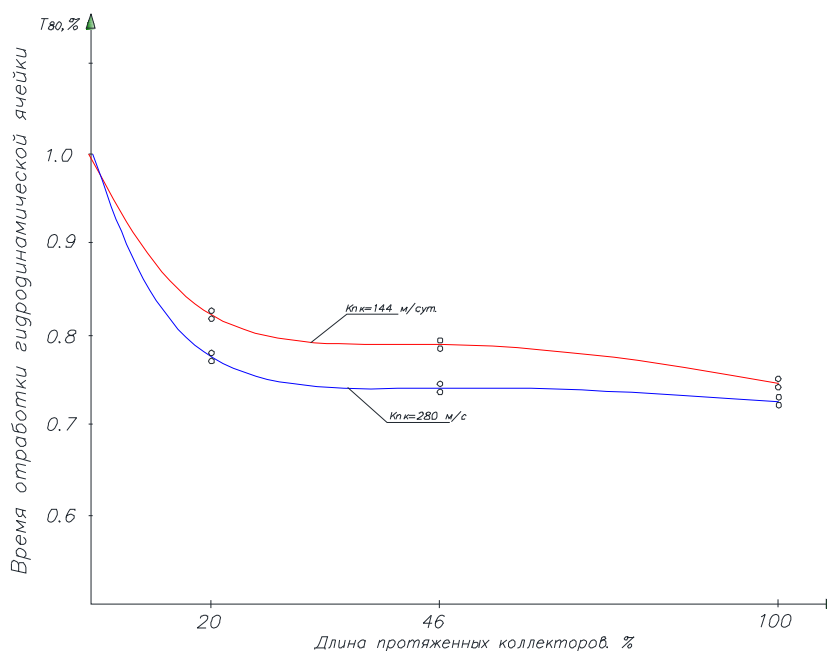


Рис.2 Зависимость времени отработки единичной гидродинамической ячейки и расхода реагента от длины протяженных коллекторов

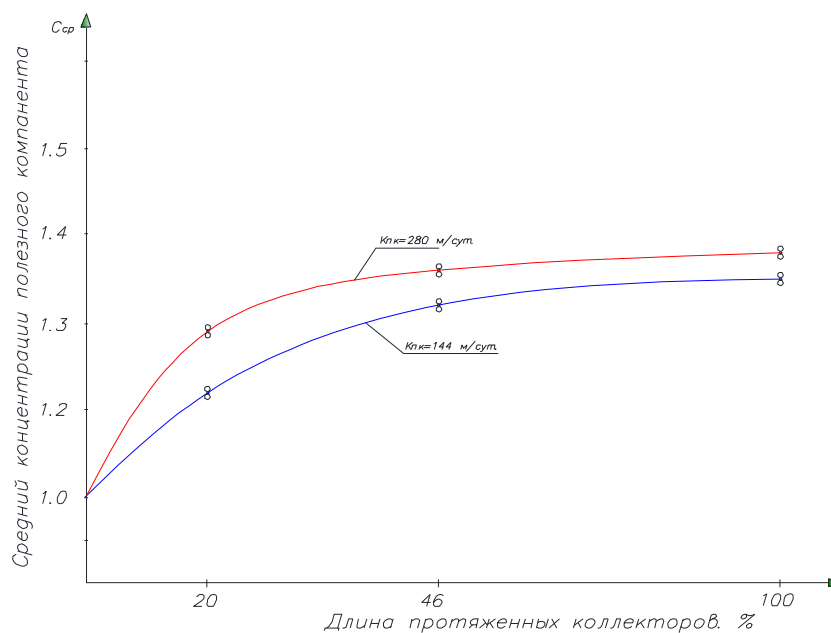


Рис.3 Зависимость среднего содержания полезного компонента в продуктивных растворах от длины протяженных коллекторов

Если рассматривать полученные закономерности с практической точки зрения, то наиболее оптимальным (вероятным при технической реализации) следует считать варианты II (с длиной коллекторов 46% и 144 м/сут) и IV (с длиной коллекторов 20% и 280 м/сут), для которых уменьшение времени обработки и расхода реагента составляет 24,2-22,4%.

2. Среднее содержание полезного компонента в продуктивных растворах имеет обратную зависимость (рис.3). С ростом длины коллектора от 0 до 25м она увеличивается на 22-35% (при проницаемости 144 м/сут) и на 29-38% (при проницаемости 280 м/сут).

В меньшей степени происходит изменение данного показателя (хотя в сторону – возрастания) при увеличении проницаемости протяженного коллектора. Для разной длины коллекторов, увеличение среднего содержания относительного начального варианта составляет (рис.5): 22-29% (при протяжении 20%), 32-36% (при протяжении 46%), и 35-38% (при протяжении 100%).

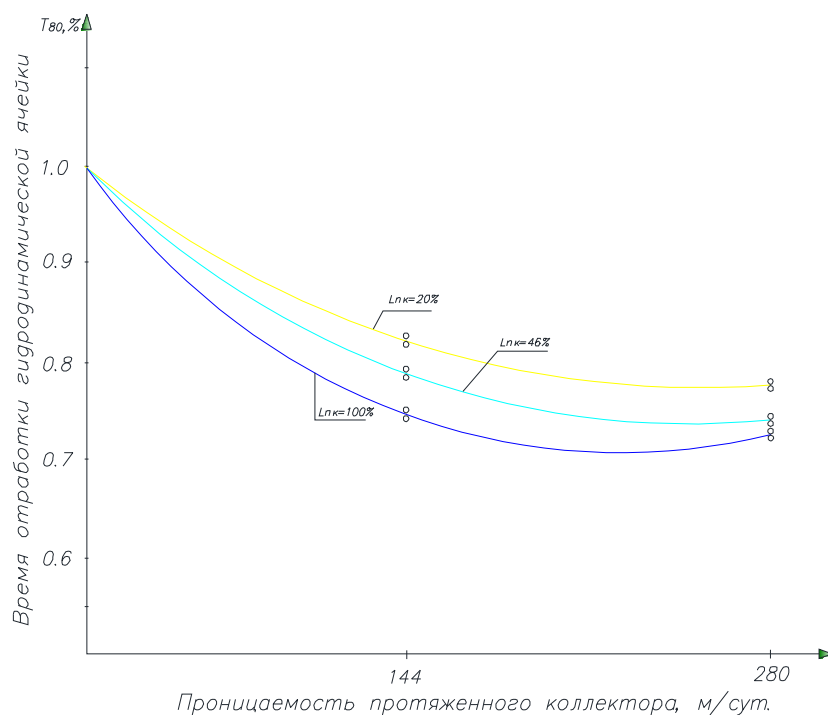


Рис.4 Зависимость времени отработки гидродинамической ячейки и расхода реагента от проницаемости протяженных коллекторов.

Тенденция к незначительному увеличению показателя средней концентрации (1,5-8%) сохраняется и при сравнении рассматриваемого показателя для случая последовательного роста для коллектора.

Для приведенных выше оптимальных вариантов II и IV, увеличение средней концентрации составляет соответственно 32-29%.

3. График относительных изменений геотехнологических показателей под влиянием длины протяженных коллекторов (рис.6) показывает незначительную величину этих изменений для всех показателей при сохранении общей направленности.

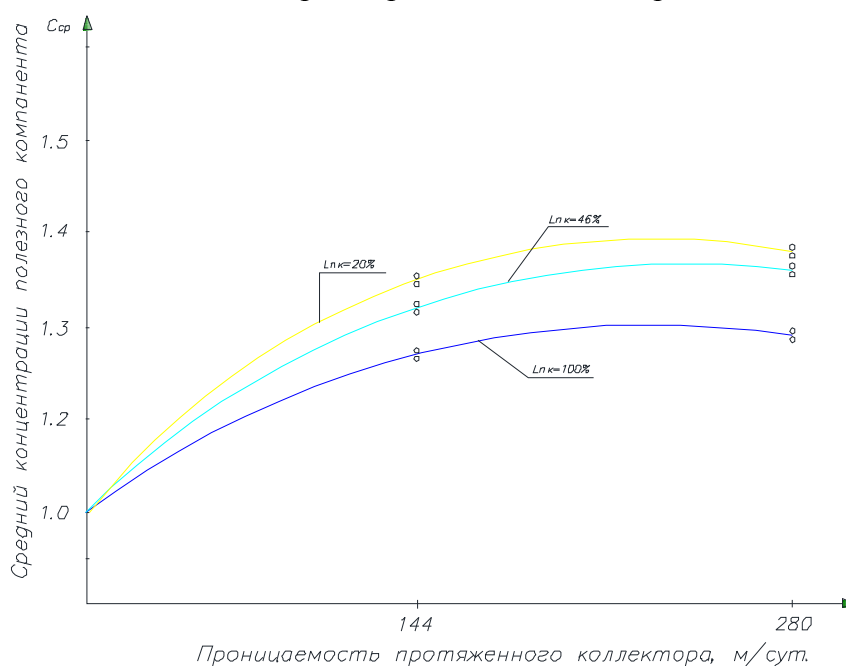


Рис.5 Зависимость средней концентрации полезного компонента в продуктивных растворах от проницаемости протяженных коллекторов.

4. В результате воздействия протяженных коллекторов на пласт происходит перераспределение интенсивности проработки внутри каждой ячейки, а именно, средние и периферийные части прорабатываются более интенсивно, чем центральные (осевые). Как показало сравнения двух вариантов IV, V и IVa, Va, время отработки (для 80% извлечения запасов) с учетом происходящего самораспределения расхода по длине протяженного коллектора уменьшается на 16-20%.

Применение высокопроизводительных насосов для ГРП повышает качество операции во многих аспектах. Повышение давления нагнетания до 4,8 МПа после разрыва при 2,5 МПа обеспечивает развитие все новых трещин, а высокие скорости движения жидкости по трещинам способствует большому проникновению фильтрующего материала в продуктивный горизонт.

Для предупреждения смыкания берегов трещин и сохранения их в раскрытом состоянии после снижения давления ниже величины давления разрыва проводится операция по закачке фильтрующего материала с помощью эжектора, который одновременно выполняет функции расклинивающего аппарата. При этом используются различные составы и материалы: от смеси вязких нефтей со свинцовыми шариками до смеси воды с гранулированным полиэтиленом.

В самом общем случае процесс закачки фильтрующего материала в трещину моделируется движением гетерогенной двухфазной смеси или суспензии в канале, поэтому естественнее описывать этот процесс с точки зрения континуальной теории механики сплошных сред, приняв следующие допущения:

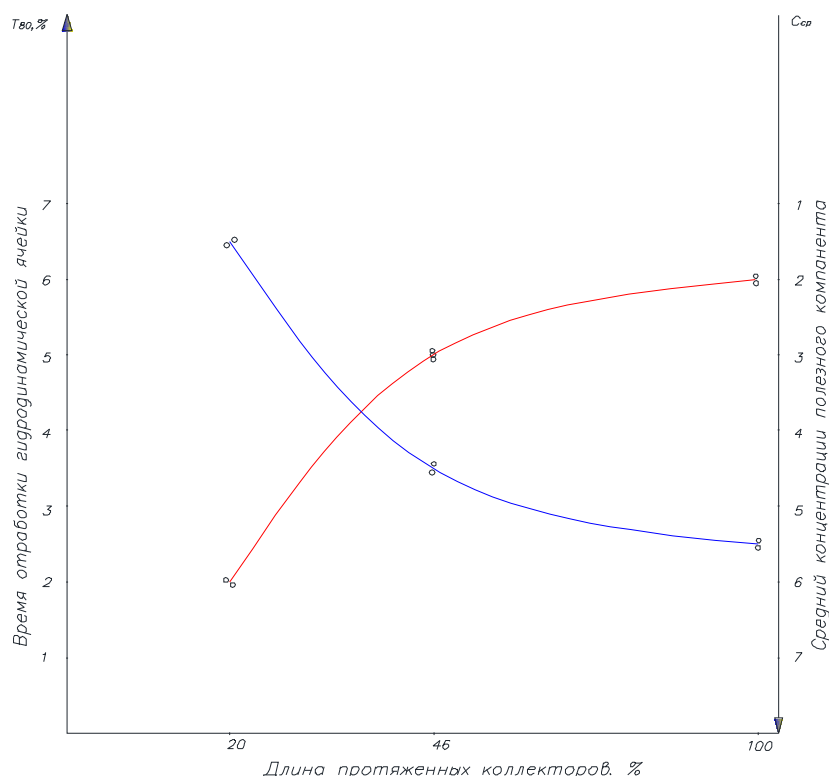


Рис.6 Относительные изменения геотехнологических показателей под влиянием длины протяженных коллекторов.

- характерной размер частиц твердой фазы в смеси во много раз больше молекулярно- кинетических параметров (расстояний между молекулами жидкой фазы, средних длин свободного пробега молекул жидкой фазы);

- размер частиц твердой фазы много меньше расстояний, на которых существенно изменяются макроскопические или осредненные параметры смеси или отдельных фаз.

Указанные допущения позволяют описывать макроскопические параметры гетерогенной смеси в рамках представлений о сплошной среде с помощью совокупности нескольких взаимопроникающих континуумов, заполняющих один и тот же объем (область движения). При этом в каждом континууме определены свои макроскопические параметры, присущие только каждой фазе в отдельности (скорость движения, плотность, давление и т.д.).

Таким образом, движение смеси материала-заполнителя с жидкостью- носителем можно описать с помощью системы уравнений неразрывности, сохранения импульса и энергии с учетом отсутствия притока тепла и каких- либо фазовых превращений дисперсной смеси с общим давлением фаз:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 \cdot v_1) = 0, \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_2 \cdot v_2) = 0, \quad (5)$$

$$\rho_1 \frac{\partial v_1}{\partial t} = -\alpha_1 \nabla \rho_1 + \nabla^\alpha \tau_1^\alpha - F_{1\tau} + \rho_1 g_1$$

$$\rho_2 \frac{\partial v_2}{\partial t} = -\alpha_2 \nabla \rho_2 + F_{2\tau} + \rho_2 g_2,$$

$$\rho_1 \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\alpha_1 \rho_1^0}{\rho_1^\tau} \cdot \frac{\partial \rho_1^\tau}{\partial t} + x_1 F_{1\tau} (v_1 - v_2) + \tau_1 \cdot e_1$$

$$\rho_2 \frac{\partial v_2}{\partial t} = \frac{\alpha_2 \rho_2^0}{\rho_2^\tau} \cdot \frac{\partial \rho_2^\tau}{\partial t} + x_2 F_{2\tau} (v_1 - v_2)$$

$$P_1(\rho_1^0) = P(\rho_2^0) = P, \quad U_1 = U_1(\rho_1^0), \quad U_2 = U_2(\rho_2^0), \quad (6)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \rho_1^0 = \frac{\rho_1}{\alpha_1}, \quad \rho_2^0 = \frac{\rho_2}{\alpha_2} \quad (7)$$

$$x_1 + x_2 = 1 \quad (8)$$

где ρ_1, ρ_2 -приведенные плотности фаз, соответственно жидкой и твердой, кг/м³;
 v_1, v_2 -скорости движения жидкой и твердой фаз, соответственно, м/с;

P - давление фазах, МПа;

τ_1^α - тензор влияния вязких напряжений в жидкой фазе;

$F_{1\tau}, F_{2\tau}$ - силы взаимодействия между фазами, Н;

g_1, g_2 -массовые силы, действующие на частицы жидкой и твердой фаз соответственно;

e_1 -тензор скоростей деформации жидкой фазы, м/с;

U_1, U_2 -внутренняя энергия соответственно, Дж;

ρ_1^0, ρ_2^0 -истинные плотности жидкой и твердой фаз, кг/м³

x_1, x_2 - коэффициенты характеризующие долю диссипируемой кинетической энергии смеси из-за межфазного силового воздействия, составляющих для жидкой и твердой фаз;

α_1, α_2 -концентрации жидкой и твердой фаз.

Все уравнения верно отражают поведение дисперсной системы независимо от того, какой характер носит движение смеси – ламинарный или турбулентный. Однако система в таком виде, как она записана, трудноразрешима из-за ее сложности и обобщенности,

многообразия движения и форм воздействия. Поэтому необходима привлекать дополнительные уравнения упрощающего или эмпирического характера.

Второе защищаемое положение

Максимальный коэффициент полезного действия водоструйного аппарата должен оцениваться в кавитационном режиме его работы при выявлении оптимальных параметров относительного коэффициента напора нагнетания и коэффициента эжекции с учетом значения основного геометрического параметра.

Для закрепления трещин гидроразрыва обычно используются буровые насосы типа БН-32, с помощью которого в скважину подается расклинивающий материал – капроновая крошка. Известно, что буровые насосы подают в скважину гомогенные буровые растворы – бентониты для выноса шлама при бурении. Использование буровых насосов для транспортирования зернового материала связано с частыми закупорками проточной части и последующей их поломки.

Наиболее эффективно осуществлять напорную подачу в скважину крупного зернового материала для расклинивания трещин гидроразрыва, с использованием водоструйных аппаратов – гидроэлеваторов.

Водоструйный аппарат не имеет движущих механических частей, подает в напорный трубопровод достаточно крупный материал и способен создавать в напорном транспортном трубопроводе необходимые напоры (давление) для создания условий для гидроразрыва продуктивного пласта и надежного закрепления (расклинки) образовавшихся трещин. (рис.1)

Водоструйные аппараты используются во многих отраслях промышленности: горной, строительной, инженерной химии, гидрологии и др.

В связи со сложными специфическими для данной технологии способом закрепления трещин твердым материалом, выявилась необходимость в многофакторном анализе эксплуатационных возможностей такой технологической схемы гидроразрыва пласта с использованием водоструйных аппаратов. Как показали исследования водоструйных аппаратов, в настоящее время не существует надежной методики проектирования высоконапорных аппаратов, не только для специфических условий гидроразрыва пласта (ГРП), но и для значительно более простых эксплуатационных требований их использования. Возникла необходимость проведения экспертной оценки достоверности и надежности основных практических рекомендаций и базовых положений теории использования водоструйных аппаратов коллективами научно-исследовательских лабораторий и отдельных ученых, достигших в этом направлении передовых позиций в мире как в практическом, так и теоретическом направлениях.

Наиболее существенный путь практического прогноза эксплуатационных возможностей использования водоструйных аппаратов для закрепления трещин при ГРП является аналитическая оценка энергетического баланса активного и пассивного потоков, а также сил сопротивления (трения), возникающих в динамике процесса эжектирования и нагнетания. Причем, основа аналитического выражения процесса струйного нагнетания представлена единым принципом баланса всех действующих сил с учетом:

— уравнения неразрывности разнофазных потоков;

— закона сохранения энергии в различных вариациях (изменение кинетической энергии, количества движения, полных давлений, во взаимосвязи с градиентом сил, действующих в поперечном сечении проточной части).

Сложность в обосновании расходно–напорных параметров водоструйного аппарата заключается в том, что при использовании их в технологии ГРП, необходимо выявить не просто рабочую характеристику этого аппарата, а определить месторасположение на ней оптимальных режимов, как по напору нагнетания, так и по его эжектирующей способности.

При работе водоструйного аппарата при заданных начальных параметрах рабочего и эжектируемого потоков в зависимости от напора нагнетания выделяются три режима его эксплуатации:

а. Режим максимальной эжектирующей способности.

Изменение напора нагнетания водоструйного аппарата, (увеличение, в частности) не влияет на эжектирующую способность этого аппарата. Наблюдается режим развитой кавитации. Этот режим характеризуется довольно устойчивой работой водоструйного аппарата как по напору нагнетания, так и по эжектирующей способности;

б. Оптимальный режим работы водоструйного аппарата.

Наблюдаются устойчивые режимы затухания (задавливания) кавитации, но появились первые признаки уменьшения эжектируемого расхода;

в. Режим затухания кавитации.

Режим характеризуется увеличением высоты нагнетания с одновременным уменьшением эжектируемого расхода. Увеличение напора нагнетания (что необходимо для гидроразрыв пласта) приводит к перемещению верхней границы камеры разряжения (очага кавитации) в сторону начала камеры смешения при одновременном уменьшении эжектируемого потока.

Исходя из равенство суммы энергий рабочего и эжектируемого потоков и смешенного потока за диффузором водоструйного аппарата получим основное уравнение эжектирования

$$\frac{H_2}{H_0} = \frac{1}{m} \left[2 \left(1 + \alpha \left(\frac{V_1}{V_0} \right) \right) - \frac{1}{m} (1 + \alpha)^2 \right] \quad (9)$$

где m – основной геометрический параметр водоструйного аппарата.

$$m = \frac{F_2}{F_0} \quad (10)$$

F_2 – площадь поперечного сечение камеры смешения, m^2 ;

F_0 – площадь поперечного сечения рабочей насадки, m^2 ;

H_0 – напор на рабочей насадке, м.вод.ст.

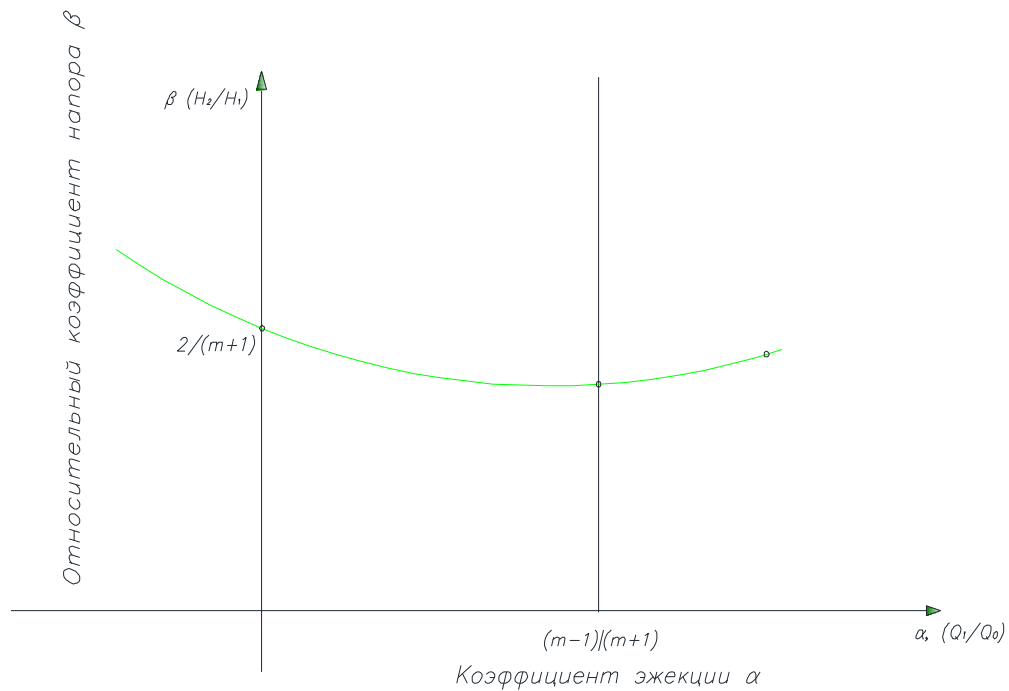


Рис.7 График зависимости относительного коэффициента напора β от коэффициента α

После несложных алгебраических преобразований, получим уравнение эжектирования водоструйного аппарата для гидравлического разрыва пласта в следующем виде:

$$\frac{H_2}{H_0} = \frac{1}{m^2} \cdot \frac{m+1}{m-1} \left(\alpha - \frac{m-1}{m+1} \right)^2 + \frac{2}{m+1} \quad (11)$$

Выражение (11) графически представляет параболу. (рис.7)

Исследуем ее на экстремум:

Первая производная по коэффициенту эжекции α

$$\left(\frac{H_2}{H_0} \right)' = 2 \frac{1}{m} \frac{m+1}{m-1} \left(\alpha - \frac{m-1}{m+1} \right) = 0 \quad (12)$$

где H_2 –напор нагнетания водоструйного аппарата, м. вод.ст.;

H_0 –рабочий напор на насадке, м. вод.ст.;

m - основной геометрический параметр, $m = \frac{D_2^2}{d_0^2}$;

D_2 –диаметр камеры смешения, м;

d_0 – диаметр рабочей насадки, м;

α –коэффициент эжекции, $\alpha = \frac{Q_1}{Q_0}$;

Q_1 –эжектируемый расход жидкости, м³/с;

Q_0 –рабочей расход жидкости, м³/с

откуда $\alpha = \frac{m-1}{m+1}$ - точка перегиба параболы

Исследуем точку перегиба $\alpha = \frac{m-1}{m+1}$

Определим отрезок, отсекаемый зависимостью $\beta=f(\alpha)$ (11) на оси относительного коэффициента напора β , т.е. при значении коэффициента эжекции $\alpha=0$ для выражения (11)

$$\beta = \frac{2}{m+1} + \frac{1}{m^2} \frac{m-1}{m+1} \quad (13a)$$

для выражения (9)

$$\beta = \frac{2}{m} - \frac{1}{m^2} \quad (136)$$

Выражения (13а) и (13б) идентичны:

При $m=2$

$$\beta = \frac{2}{3} + \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{3} = \frac{2}{3} + \frac{1}{12} = \frac{9}{12} = \frac{3}{4} \quad \text{по} \quad (13а)$$

$$\beta = 1 - \frac{1}{4} = \frac{3}{4} \quad \text{по} \quad (13б)$$

Для практических расчетов более удобна форма выражения (13б)

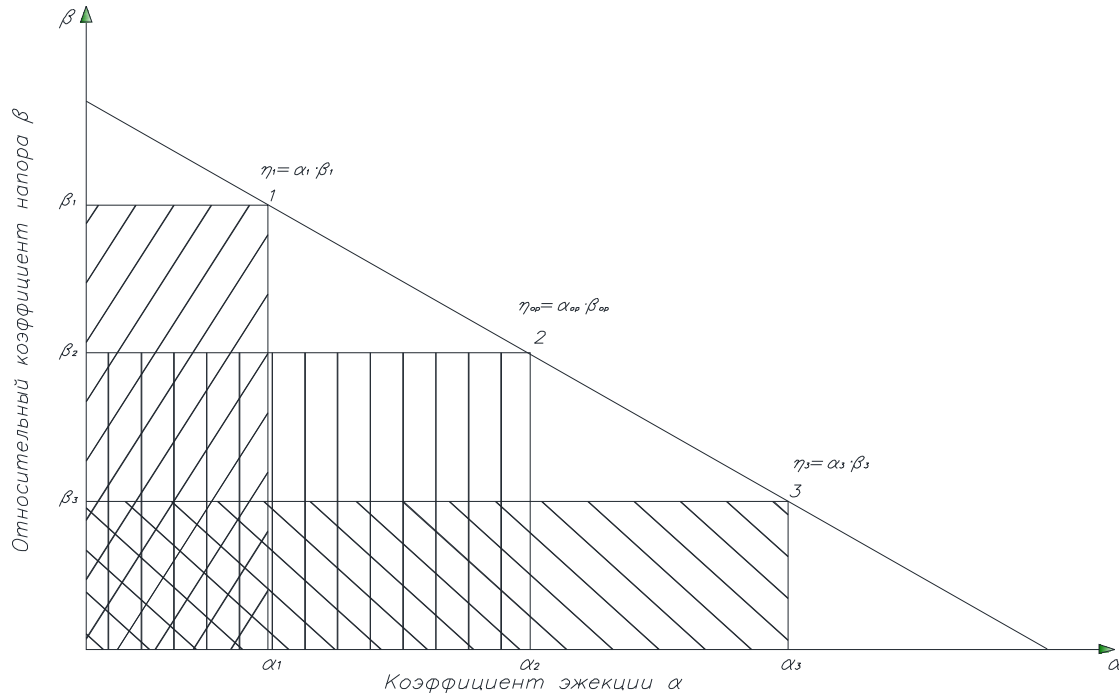


Рис.8 Схема к обоснованию оптимального режима водоструйного аппарата

В пределах рабочего участка, характеристика водоструйного аппарата $\beta=f(\alpha)$ (рис.8) является прямо пропорциональной зависимостью.

Известно, что любая точка на рабочей характеристике $\beta=f(\alpha)$ определяет кпд водоструйного аппарата

для точки 1

$$\eta = \alpha_1 \cdot \beta_1 = \frac{Q_1}{Q_0} \cdot \frac{H_2}{H_0}$$

где $Q_1 \cdot H_2$ – полезная работа водоструйного аппарата;

$Q_0 \cdot H_0$ – затраченная работа водоструйного аппарата.

Таким образом

— для точки 2 характеристики $\beta=f(\alpha)$

$$\eta_{opt} = \alpha_{opt} \cdot \beta_{opt}$$

— для точки 3 характеристики $\beta=f(\alpha)$

$$\eta_3 = \alpha_3 \cdot \beta_3$$

С другой стороны, кпд водоструйного аппарата геометрически определяется площадью прямоугольника со сторонами α и β .

Выявляется задача отыскания максимальной площади $W = \alpha \cdot \beta$, т.е. максимального кпд водоструйного аппарата для его использования при закреплении трещин в технологии ГРП.

Площадь прямоугольника равна $W = \alpha \cdot \beta$

$$\text{или } \alpha = a - \frac{\beta}{\operatorname{tg}\varphi} \quad (14)$$

$$\text{далее } W = \left(a - \frac{\beta}{\operatorname{tg}\varphi} \right) \cdot \beta \quad (15)$$

где φ – угол наклона характеристики $\alpha=f(\beta)$ к оси абсцисс α

Для того чтобы найти оптимальные параметры водоструйного аппарата, необходимо обосновать существование экстремума функции площади (кпд) (15).

Первая производная по β

$$W' = \left(\alpha \cdot \beta - \frac{\beta^2}{\operatorname{tg}\varphi} \right)' = \alpha - 2\beta \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi}, \quad (16)$$

где $\operatorname{tg}\varphi = \frac{b}{a}$.

a, b – отрезки отсекаемые расходно-напорной характеристикой водоструйного аппарата $\beta=f(\alpha)$ (рис. 8) на координатных осях α и β .

Таким образом

$$W' = \alpha - 2\beta \frac{a}{b} \quad (17)$$

Вторая производная равна

$$W'' = \left(\alpha - 2\beta \frac{a}{b} \right)' = -2 \frac{a}{b} - \text{отрицательна}$$

Следовательно, можно заключить: если вторая производная функции (15) отрицательна, значит у этой функции существует экстремум. Чтобы найти координаты этого экстремума, необходимо первую производную функции (15) приравнять к нулю

$$W' = \alpha - 2\beta \frac{a}{b} = 0$$

Далее решая это уравнение, получим

$$\alpha \left(1 - 2\beta \frac{1}{b} \right) = 0 \text{ или } \beta = \frac{b}{2} \quad (18)$$

Поскольку в треугольнике зависимости $\beta=f(\alpha)$ (рис.8) значение $\beta=\frac{b}{2}$ является средней линией этого треугольника, то

$$\alpha = \frac{a}{2} \quad (19)$$

Таким образом, координаты оптимального режима (максимального кпд) водоструйного аппарата имеют вид

$$\alpha = \frac{a}{2} \text{ и } \beta = \frac{b}{2} \quad (20)$$

Согласно установленному правилу (20) режим работы водоструйного аппарата с максимальным кпд ($\eta=\max$) по выражению (13б), значение относительного коэффициента напора β равно

$$\beta_{\text{опт}} = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{m} - \frac{1}{m^2} \right) = \frac{1}{m} - \frac{1}{2m^2} \quad (21)$$

Для практических расчетов можно принять

$$\beta_{\text{опт}} = \frac{1}{m} \quad (22)$$

Третье защищаемое научное положение:

Оптимальные расходно-напорные возможности водоструйного аппарата в технологии ГРП могут быть определены при коэффициенте полезного действия, не превышающем 26,7%.

Принимая во внимание, что скорость подсасываемой жидкости значительно меньше скорости рабочей ($\frac{v_1}{v_2} \sim 0$) по выражению (9), тогда это выражение несколько упростится

$$\frac{H_2}{H_0} = \frac{1}{m} \left[2 - \frac{1}{m} (1 + \alpha) \right]^2 \quad (23)$$

Или

$$\frac{H_2}{H_0} = -\frac{1}{m^2} (1 + \alpha)^2 + \frac{2}{m} \quad (24)$$

Выражения (24) графически также представляет собой параболу (рис.9). Исследуем ее на экстремум.

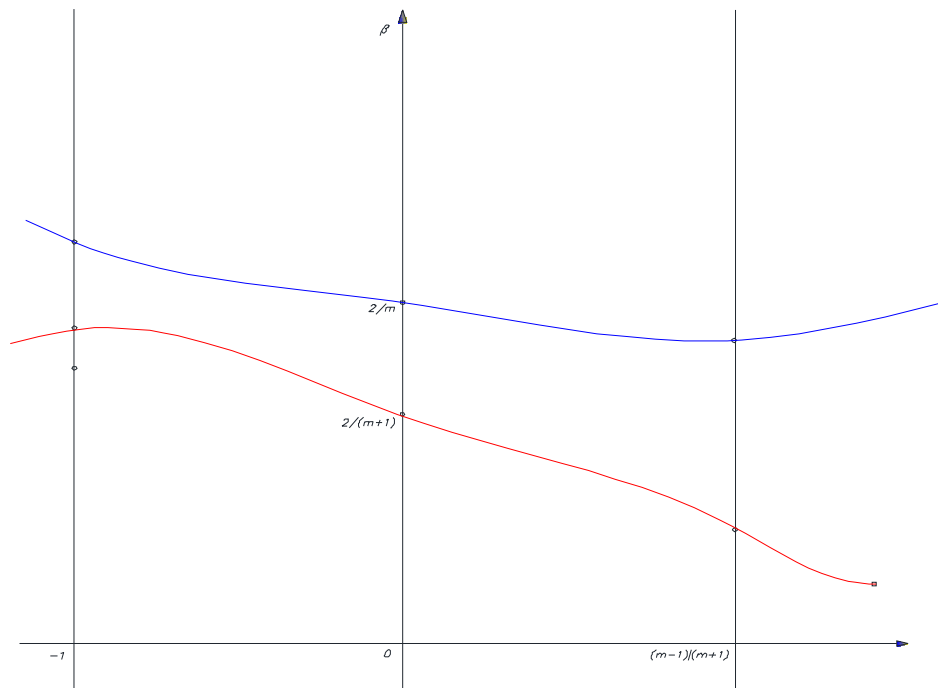


Рис.9 Схема для обнаружение оптимума коэффициента эжекции $\alpha_{\text{ср}}$

Первая производная по выражению (24)

$$\beta' = -\frac{2}{m^2} (1 + \alpha) = 0, \quad \alpha = -1 \text{ (точка перегиба параболы (рис.7))}$$

Вторая производная

$$\beta'' = -\frac{2}{m^2} < 0 \text{ (значит, точка перегиба } \alpha = -1 \text{ является минимумом)}$$

Определим отрезок, отсекаемых зависимости $\beta=f(\alpha)$ на оси β , т.е. при $\alpha=0$

$$\beta = \frac{2}{m} - \frac{1}{m^2} \quad (25)$$

Как видно, выражение (25) идентично ранее полученному (13б), что подтверждает правильность искомых положений и практическое совпадение двух парабол (рис.7) при значении

$$\alpha=0 \sim \frac{m+1}{m-1}$$

Исходя из (20)

$$\beta_{opt} = \frac{1}{m} - \frac{1}{2m^2} \quad (26)$$

Поскольку зависимость (24) отсекает отрезки, как по оси β так и по оси α (в тоже время зависимость (9) отсекает отрезок только по оси β равный (23), определим отрезок по оси α , при $\beta=0$ для выражения (24)

$$\alpha = \sqrt{2m}-1 \quad (27)$$

Или

$$\alpha_{opt} = \frac{\sqrt{2m}-1}{2} \quad (28)$$

Или

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{m}{2}} - \frac{1}{2} \quad (29)$$

Исследователь Б.Э.Фридман в результате приведенных опытов установил, что отрезок отсекаемый расходно-напорной зависимостью водоструйного аппарата $\beta=f(\alpha)$ на координатной оси β связан с основным геометрическим параметром m следующим образом

$$B=k \cdot m+c \quad (30)$$

где k и c – опытные коэффициенты ($k=0.516$; $C= 0,34$)

На основании многочисленных опытных данных Фридманом Б.Э. установлено, что отрезок отсекаемый зависимости $\beta=f(\alpha)$ на оси α равен

$$a = \frac{2,346m+1.547}{m^2+2m} \quad (31)$$

Используя выражения (30) и (31), а также установленное ранее нами правило отыскания оптимального режима эксплуатации водоструйного аппарата (20), получим

$$\alpha = \frac{a}{2} \text{ и } \beta = \frac{b}{2}, \text{ а кпд } \eta_{max} = \frac{a \cdot b}{4} \quad (32)$$

$$\eta_{max} = a \cdot b = \frac{1}{4} \cdot \frac{(2.348m+1.547)(0.516m+0.34)}{m^2+2m} \quad (33)$$

Выражение (33) определяет максимальные значения кпд (η_{max}) для водоструйного аппарата при конкретном значении основного геометрического параметра m .

Взяв производную по выражению (33) и приравняв ее к нулю, определим оптимальные значения основного геометрического параметра m_{opt} среди η_{max} при множестве значений m .

$$(\alpha \cdot \beta) = [2.346(0.516 \cdot m + 0.34) + 0.516(2.348m + 1.547)(m^2 + 2m) - (2.348m + 1.547)(0.516m + 0.34)(2m + 2) = 0$$

После несложных алгебраических преобразований, получим

$$0,83m^2 - 1,05m - 1,05 = 0; m = \frac{1.05 + \sqrt{1.1 + 3.5}}{2 \cdot 0.83} = \frac{1.05 + 2.12}{1.65} = \frac{3.17}{1.66} = 1.91$$

Таким образом, оптимальные значения основного геометрического параметра m , равно

$$m = \frac{F_2}{F_0} = 1.91 \quad \text{и} \quad \frac{D_2}{d_0} = 1.38 \quad (34)$$

Значение основного геометрического параметра $m=1.91$ соответствует работе водоструйного аппарата с максимально достижимым кпд (η_{max}) среди всех возможных типоразмеров значения m .

Подставив полученное значение основного геометрического параметра $m=1.91$ в выражение (33), получим реальный, практически достижимый кпд водоструйного аппарата.

$$\alpha \cdot \beta = \frac{1}{4} a \cdot b, \quad m = 1.91$$

$$\alpha \cdot \beta = \frac{1}{4} \frac{(2,348 \cdot m + 1.542)(0.516 + 0.34)}{m^2 + 2m} \quad (35)$$

$$\alpha \cdot \beta = \frac{1}{4} \frac{(2,348 \cdot 1.91 + 1.542)(0.516 + 0.34)}{1.91^2 + 2 \cdot 1.91} \quad (36)$$

$$\alpha \cdot \beta = \frac{7.97}{29.9} = 26.7\%$$

Используя оптимальное значение относительного коэффициента напора β , получим оптимальное напорное соотношение водоструйного аппарата при

$$m_{opt} = 1.91$$

$$\beta = \frac{1}{m} = \frac{1}{1.91} = 0.524$$

Таким образом, чтобы создать в зоне ГРП необходимый напор, например, $H_2 = 400\text{м}$ (40атм.), давление на водяном насосе должно соответствовать

$$H_0 = \frac{H_2}{0,524} = \frac{400}{0,524} = 763\text{м или } 76,3\text{атм.}$$

Заключение

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований содержится новое решения задачи, заключающееся в усовершенствований технологии гидроразрыва пласта, включающей опытные зависимости по эксплуатации технологических скважин при подземном выщелачивании с протяженными коллекторами; в обосновании и оптимизации работы водоструйных аппаратов для пескового закрепления трещин, что имеет существенное значение для развития физико-химической геотехнологии республики Узбекистан.

Основные научные и практические результаты исследований заключается в следующем:

1. На основании анализа и обобщения практического опыта эксплуатации участков подземного выщелачивания на НГМК и республики Казахстан, было установлено, что технологические скважины приходят в аварийное состояние после 30-50 дней эксплуатации из-за кольматации их прифилтровой зоны.

2. Проведена систематизация методов воздействия на прифилтровую зону технологических скважин.

3. Аналитически установлено, что процесс закачки фильтрующего материала в трещину гидроразрыва моделируется закономерностью движения гетерогенной двухфазной смеси или суспензии в канале, поэтому естественнее описывать этот процесс с точки зрения континуальной теории механики сплошных сред.

4. Движение смеси материала-наполнителя с жидкостью носителем рекомендуется описать с помощью системы уравнений неразрывности, сохранения импульса и энергии с учетом отсутствия притока тепла и каких-либо фазовых превращений дисперсной смеси с общим давлением фаз.

5. Установлено, что время отработки одиночной гидродинамической ячейки пропорционально связанному с ним показателем удельного расхода рабочего реагента и с увеличением длины протяженного коллектора сокращается на 18÷20% (при проницаемости коллектора до 144м/сут.) и на 22,4÷27% (при проницаемости коллектора до 280м/сут). При этом сравнение рассматриваемых показателей для различной протяженности коллектора (от 20% до 100%) выявляет весьма незначительное их сохранение (в пределах 2-8%).

6. Установлено, что с практической точки зрения, наиболее оптимальным (вероятным при технологической реализации) следует считать варианты с длиной коллектора 46% и проницаемостью 144м/сут и длиной коллектора 20% и проницаемостью 280 м/сут, для которых уменьшение времени отработки и расхода реагента составляет 24,2÷22,4%.

7. Практически определено, что среднее содержания полезного компонента в продуктивных растворах имеет обратно-пропорциональную зависимость, причем с ростом длины коллектора от 25 м., содержание увеличивается на 22-32% (при проницаемости 280 м/сут).

8. Установлено, что в результате воздействия протяженных коллекторов на продуктивный пласт, происходит перераспределение интенсивности проработки внутри каждой ячейки, а именно, средние и периферийные части прорабатываются более интенсивно, чем центральные. Время отработки с учетом происходящего самораспределения расхода по длине протяженного коллектора уменьшается на 16÷20%.

9. Аналитически обоснован оптимальный режим эксплуатации водоструйного аппарата в процессе гидроразрыва пласта и закрепления образовавшихся трещин песком.

10. Аналитически составлено выражение напорного эжектирования водоструйного аппарата и выявлены его оптимальные параметры напора нагнетания и режимов всасывания в зависимости от конструктивных особенностей (значения основного геометрического параметра).

11. Аналитически выявлены координаты оптимальной эксплуатации водоструйного аппарата при гидроразрыве пласта и достижимый при этом коэффициент полезного действия.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Маркелов С.В., Халимов И.У., Баймурзаев Х.Р., Аликулов Ш.Ш. Влияние химической кольматации порово-трещинного массива на производительность блоков подземного выщелачивание// Горный журнал, 2011. -№6..

2. Малухин Н.Г., Халимов И.У. Обоснование использования водоструйных аппаратов в технологии гидроразрыв пласта // ВЕСТНИК РАЕН, 2014/1. 14.

а также в других изданиях:

3. Халимов И.У. Разработка методов восстановления эксплуатационных скважин при СПВ // Междунар. конф. "Наука и новейшие технологии при поисках полезных ископаемых". 30 марта-5 апреля 2012 г.

4. Халимов И.У. Выбор типа и конструкции призабойной части технологических скважин // Междунар. конф. "Наука и новейшие технологии при поисках полезных ископаемых". 30 марта-5 апреля 2012 г.

