

УДК 622.276

С.Б. Бекетов, А.Ю. Косяк

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНО-СТЕНДОВЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ
СОСТАВОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КАРБОНАТНЫХ
КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
ПРИТОКА УГЛЕВОДОРОДОВ**

Как свидетельствует практика разработки нефтяных, газовых, газо-конденсатных месторождений, а также ПХГ, производительность эксплуатационных скважин со временем может снижаться в связи с ухудшением фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны пласта (ПЗП) под действием целого комплекса причин (кольматация ПЗП в процессе проведения ремонтных работ, разбухание глинистых частиц при контакте с пластовой водой, выпадение в осадок солей из пластовой воды и т.д.).

С целью восстановления фильтрационно-емкостных свойств ПЗП применяются различные методы воздействия на пласт. Одним из направлений повышения производительности скважин являются пенокислотные обработки (ПКО).

Обработка пласта вспененной пенокислотной эмульсией (ПКЭ) по сравнению с обычной кислотной обработкой позволяет производить углубленное воздействие на пласт кислотой и расширить мощность пласта, охваченного воздействием ПКЭ во время нагнетания. В результате увеличивается мощность работающего интервала пласта, расширяется профиль притока, возрастает эффективность процесса в целом [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Замедление скорости реакции ПКО с породой и увеличение глубины проникновения кислоты в пласт обусловлено прилипанием пузырьков газа к поверхности

породы. Пена, проникая в наиболее проницаемые пропластки, насыщает раздренированную зону вокруг скважины, увеличивает сопротивление нагнетанию, давлением нагнетания возрастает и воздействием охватываются менее проницаемые продуктивные пропластки, в результатекратно увеличивается объем обрабатываемого пласта.

Повышенная эффективность ПКО обусловлена еще и тем, что поверхностно-активное вещество, присутствующее в ПКЭ, пузырьки пены являются диспергаторами, предотвращающими уплотнение в призабойной зоне продуктов реакции. При вызове притока флюидов из пласта присутствие газовой фазы содействует выносу продуктов реакции, а следовательно, лучшему очищению ПЗП. Этому способствует также эффект флотации – прилипание частиц продуктов реакции к пузырькам газа. В результате возрастает эффективность воздействия на пласт, происходит приобщение к работе не работавших ранее продуктивных пропластков, увеличивается дебит работающих мощностей, расширяется радиус охвата кислотой пласта. Для ПКО в зависимости от конкретных горно-геологических условий месторождения или ПХГ, необходимо применение различных по составу пенокислотных эмульсий. В качестве газовой фазы для образования пенокислоты возможно при-

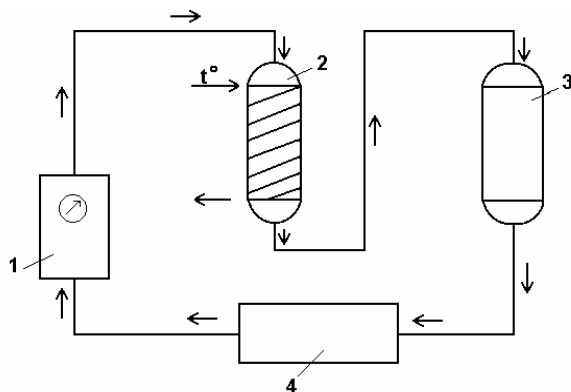


Рис. 1. Схема лабораторной установки для моделирования взаимодействия пенокислотной эмульсии с породой: 1 - насос; 2 - теплообменник; 3 - кернодержатель; 4 - емкость с эмульсией.

менение природных или инертных газов [1, 6, 7, 8].

Для проведения лабораторных исследований с целью разработки составов пенокислотных эмульсий (ПКЭ) была собрана специальная установка (рис. 1), включающая кернодержатель 3, теплообменник 2, насос 1 и емкость 4 установленную на магнитной мешалке. Такая схема позволяет проводить стендовые испытания в динамических условиях при различных температурах - ПКЭ постоянно прокачивается с заданной скоростью через породу в течение заданного времени.

Для большей объективности нами были выбраны разные типы известняков различных газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождений Северного Кавказа и Сибири, залегающих в разных горно-геологических условиях. Тип известняков: органогенные и органогенно-обломочные. Содержание глинистого материала в образцах до 25 %.

Тип пористости известняков кавернозно-порово-трещинные. опыты проводились как с естественными образцами кернов, так и искусственными.

При проведении экспериментов, для создания искусственных образцов кернов, была изготовлена и отсеяна однородная известковая фракция частиц размером 2-3 мм; все опыты проводились только с такими частицами. Общая поверхность стандартных навесок, набиваемых в кер-

нодержатель одинакова; масса навесок - 50 г. Скорость прокачки ПКЭ пропорционально соответствовала производительности тампонажных агрегатов при закачке ПКЭ в скважину в реальных условиях. Исследования проводились при температурах, соответствующих пластовым на выбранных месторождений и ПХГ.

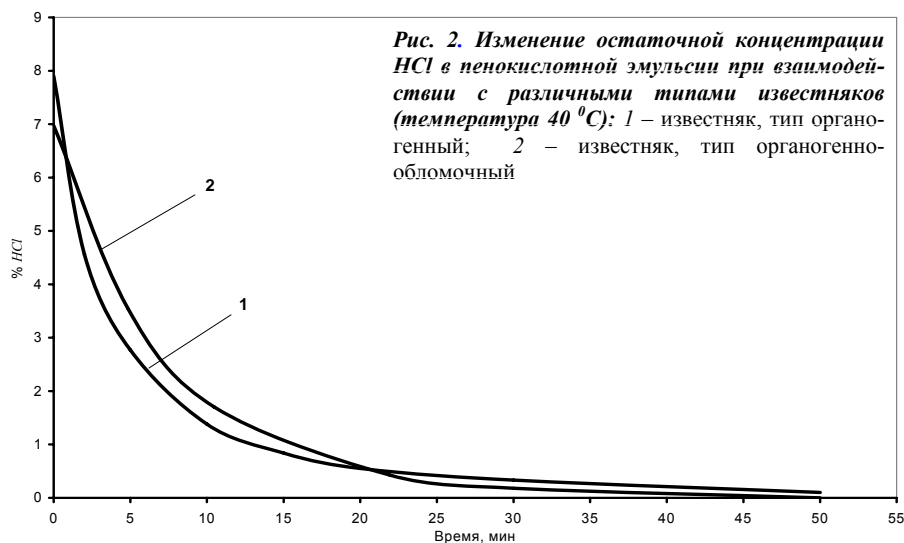
Исходя из условия доступности реагентов, относительно невысокой их стоимости (что имеет немаловажное значение сегодня), а также максимальной эффективности воздействия на породы полученной ПКЭ, нами проводились работы по определению оптимального состава пенокислотной эмульсии с максимальным использованием отечественных реагентов:

- ПАВ;
- соляной кислоты товарной;
- дизельного топлива (газоконденсата);
- технической воды.

Во всех случаях определялась масса известняка после эксперимента (для исключения ошибки от содержания остаточной влаги образец высушивался до постоянного веса) и вычислялась потеря массы за счет растворения карбоната кальция пенокислотой.

Результаты исследований приведены на рис. 2, 3, 4.

Как показали результаты лабораторно-стендовых исследований, воздействие эмульсии на образцы различных известняков примерно одинаково (рис. 2). Как



видно из этих рисунков, основная часть HCl в пенокислоте практически полностью вырабатывается в течение 30 минут. Потеря массы известняка четко коррелируется с ростом концентрации кислоты. Сравнение полученных нами лабораторных данных позволяет сделать вывод, что скорость растворения используемых в опытах известняков достигает максимума

при содержании HCl в ПКЭ уже порядка 7 % и определяется площадью порового пространства известняка. Дальнейшее повышение содержания HCl до 10 % влияния на скорость растворения известняков не оказывает, но позволяет обработать пласт на большую глубину за счет большей остаточной концентрации HCl .

Для успеха пенокислотной обработки

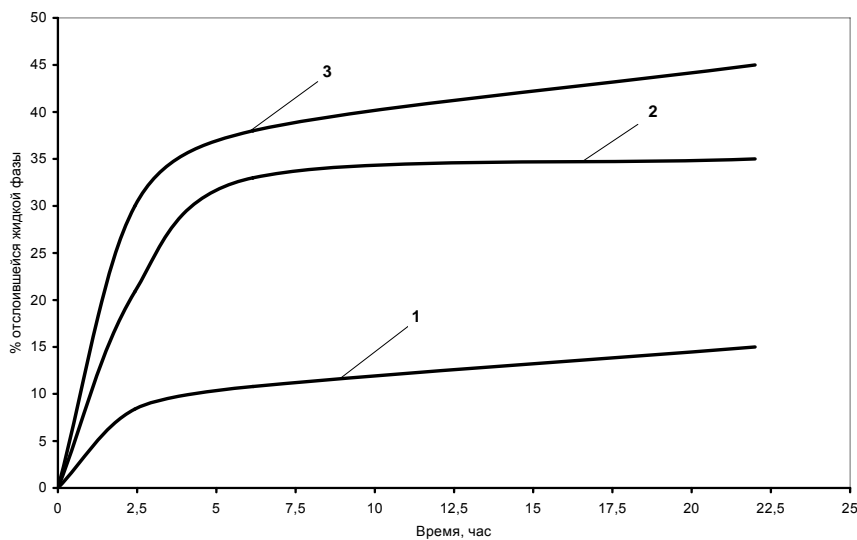
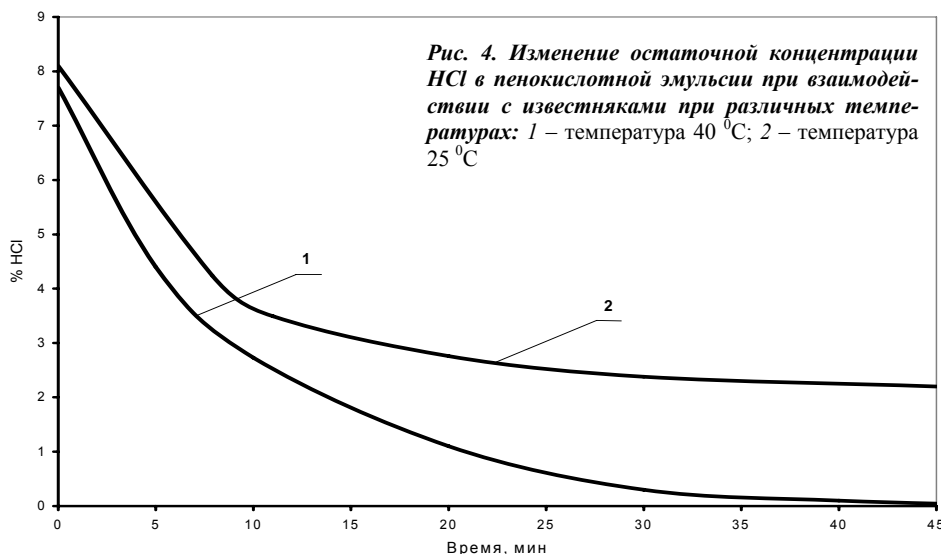


Рис. 3. Зависимость устойчивости пенокислотной эмульсий от содержания ПАВ: 1 – содержание неонала 1,5 %; 2 – содержание неонала 1 %; 3 – содержание неонала 0,5 %



важное значение имеет устойчивость создаваемой поверхностно-активным веществом пены. Как показали результаты исследований, содержание ПАВ (в опытах нами использовались наиболее распространенные типы ПАВ: неонол АФ-9-12, ОП-10, морпен, ТЭАС; ТЭАС-М; прогресс; сульфонол) в пределах 1-1,5 % на скорость растворения органических известняков не оказывает существенного влияния. По устойчивости создаваемой пены из проверенных ПАВ лидирует морпен, ТЭАС и ТЭАС-М - они предназначены производителем для пожаротушения, где статическая устойчивость создаваемой пены является важнейшей характеристикой. Кроме того, пенообразователь морпен показал лучшие результаты по вспениванию минерализованных вод, что также может иметь важное значение при проектировании пенокислотной обработки. Для удаления из скважины оставшихся продуктов реакции важна выносящая способность ПАВ, связанная с максимальной динамической кратностью применяемого пенообразователя. По этому показателю лидируют неонол, нижеголь и прогресс - кратность пены более 20-ти (у морпена и ТЭАС - более 6 по ТУ). Неионогенные

ПАВ склонны к образованию стойких эмульсий с углеводородными жидкостями, в частности, с газовым конденсатом, что повышает устойчивость применяемой для пенокислотной обработки системы. Кроме того, неонол является одним из самых дешевых на сегодняшний день отечественных пенообразователей, неплохие результаты получены при использовании ОП-10.

Для определения оптимальной концентрации поверхности активного вещества были проведены опыты по исследованию устойчивости пенокислотной эмульсии при концентрации неонола - 0,5 %, 1 %, 1,5 % соответственно, рис. 3. Как видно на рисунке, при концентрации ПАВ 0,5 % отслоение жидкой фазы превышает 40 % уже через 5 час. ее отстаивания. Увеличение содержания ПАВ до 1 % обеспечивает отслоение жидкой фазы не более 33 % за время наблюдения, а при содержании ПАВ 1,5 %, отслоение жидкой фазы не превышает 15 % за 25 час. наблюдения, т.е. устойчивость эмульсии резко возрастает. Дальнейшее увеличение содержания ПАВ, как показали исследования, не приводит к столь существенному увеличению стойкости создаваемой пенокислоты. Та-

ким образом, оптимальное содержание ПАВ неонол для исследуемой эмульсии составляет 1,5 %.

Естественно скорость взаимодействия *HCl* с известняками зависит и от температуры. На рис. 4 приведены фактические данные по изменению остаточной концентрации *HCl* в пенокислотной эмульсии при взаимодействии с органогенными и органогенно-обломочными известняками в лабораторных условиях. При температуре 40 °С *HCl* в эмульсии практически полностью вырабатывается за 45 мин., а при 25 °С остаточная концентрация *HCl* на этот момент времени составляет еще 2,2 %.

Таким образом, полученные результаты лабораторно-стендовых исследований позволили нам разработать оптимальные составы пенокислотных эмульсий, обладающие удовлетворительными реологическими свойствами, приготавливаемые из доступных и дешевых отечественных реагентов. Полученные составы обладают хорошими растворяющими свойствами при взаимодействии с органогенными и органогенно-обломочными известняками различных нефтяных, газовых месторождений и ПХГ Сибири и Северного Кавказа. Применение разработанных составов на различных объектах показало их высокую эффективность [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Освоение скважин.* Булатов А.И., Качмар Ю.Д., Макаренко П.П., Яремийчук Р.С. – М.: Недра. – 1999. – С. 472.
2. *Серета Н.Г., Сахаров В.А., Тимашев А.Н.* Спутник нефтяника и газовика. – М.: Недра. – 1986. – С. 325.
3. *Абдулин Ф.С.* Повышение производительности скважины. – М.: Недра. – 1975. – С. 264.
4. *Кудинов В.И., Сучков Б.М.* Интенсификация добычи вязкой нефти из карбонатных коллекторов. – М.: Недра. – 1994. – С. 233.
5. *Амиян В.А., Амиян А.В., Васильева Н.П.* Вскрытие и освоение нефтегазовых пластов. – М.: Недра. – 1980. – С. 380.
6. *Бекетов С.Б.* Технология пенокислотного воздействия на продуктивные отложения с

целью интенсификации притока флюидов. Горный информационно-аналитический бюллетень, № 6. 2004. – М.: Изд-во МГГУ. – С. 56-59.

7. *Долгов С.В., Бекетов С.Б.* Технология интенсификации добычи газа в скважинах ПХГ Чирен / Сборник научных трудов «Строительство газовых и газоконденсатных скважин». – М.: ВНИИГаз. – 1993. – С. 66-68.

8. *Бекетов С.Б.* Результаты интенсификации притока газа пенокислотными обработками продуктивных отложений на подземных хранилищах газа. Горный информационно-аналитический бюллетень, № 5. 2004. – М.: Изд-во МГГУ. – С. 320-324.

Коротко об авторах

Бекетов С.Б. - кандидат технических наук, первый заместитель начальника НТЦ ООО «Кубань-газпром», г. Краснодар.
Косяк А.Ю. – соискатель кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин» СевКавГТУ, генеральный директор ЗАО СП «МеКаМиннефть».



УДК 622.276

С.Б. Бекетов, А.Ю. Косяк, Ю.К. Дмитриади

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ПЕНОКИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ
СКВАЖИН С ЦЕЛЬЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
ПРИТОКА УГЛЕВОДОРОДОВ**

Одним из составляющих успешности выполнения работ по интенсификации притока углеводородов является правильное определение технологических параметров процесса применительно к геолого-техническим условиям объекта интенсификации [1, 2, 3, 4].

Процесс закачки пены в пласт (при пенокислотном воздействии) на расстояние R_o от ствола скважины с целью обработки запланированной зоны (рис. 1) в течение заданного времени $T_{зак}$ характеризуется рядом управляемых технологических параметров, в частности:

- давлением закачки пены $P_{зак}$;
- плотностью пены (степенью аэрации α).

Примем во внимание обстоятельство, что пену в пластовых условиях с допущениями можно считать слабо сжимаемой жидкостью (СЖ).

На контуре питания радиусом R_k выполняется условие:

$$P_k = P_{пл} \quad (1)$$

где P_k – давление на контуре питания, Па; $P_{пл}$ – пластовое давление, Па.

На забое скважины радиусом r_c выполняется условие:

$$P_c = P_{заб} \quad (2)$$

где P_c – давление на стенке скважины в интервале фильтра, Па; $P_{заб}$ – давление на забое скважины, Па.

Причем $P_{заб} > P_{пл}$ (условие закачки). Мощность пласта h , его проницаемость k и открытая пористость m постоянны в процессе закачки.

Примем обозначения (рис. 1):

- R_o , r_f – конечное и текущее положение границы закачиваемой пены, соответственно;

- P_t – давление на границе раздела пена СЖ–Г.

Для определения данных технологических параметров закачки применимо решение задачи о движении границы раздела СЖ и газа (Г) в условиях плоскорадиального установившегося движения по закону Дарси в пласте [5].

Давление на границе раздела СЖ–Г находится из условия равенства массовых скоростей фильтрации пены и газа на этой границе при $r = r_f$:

$$\frac{k\rho_g(P_t^2 - P_k^2)}{2\eta_g P_{ам} \ln(R_k/r_f)} \cdot \frac{1}{r_f} = \frac{k\rho_n(P_c - P_t)}{\eta_n \ln(r_f/r_c)} \cdot \frac{1}{r_f} \quad (3)$$

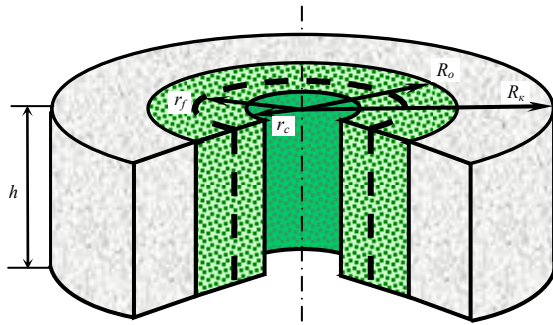


Рис. 1. Схема формирования зоны проникновения пены в пласт:
 R_k – радиус контура питания; R_o – заданный радиус зоны обработки пласта; r_c – радиус скважины; r_f – радиус проникновения пены в пласт в момент времени T , h – мощность пласта

при этом
$$\rho_n = \frac{\rho_{пож} \cdot Q_{пож} \cdot P_{пл}}{Q_{пож} \cdot P_{пл} + Q_z P_{ам}},$$

где ρ_r – плотность газа в н.у., кг/м³; η_z – динамический коэффициент вязкости газа, Па с; $P_{ам}$ – атмосферное давление, Па; ρ_n – плотность пены в пластовых условиях, кг/м³; η_n – динамический коэффициент вязкости пены, Па с; $\rho_{пож}$ – плотность ПОЖ, кг/м³; $Q_{пож}$ – расход ПОЖ, м³/с; Q_z – расход газа, м³/с.

Решая равенство (3) относительно P_t , после определенных математических преобразований получим выражение:

$$P_t = P_c - \frac{\eta_o \cdot \ln(r_f / r_c) \cdot (P_c^2 - P_k^2)}{2 \cdot \rho_o P_{ам} \ln(R_k / r_f)} \quad (4)$$

при этом $\eta_o = \frac{\eta_n}{\eta_z}$, $\rho_o = \frac{\rho_n}{\rho_z}$.

Полученное уравнение (4) распределения давления на границе потока СЖ–Г дает возможность определить основные характеристики рассматриваемого процесса закачки порции пены в призабойную зону газоносного пласта.

1. Распределение давления в зоне закачиваемой пены

$$P_n = P_c - \frac{\eta_o \cdot (P_c^2 - P_k^2)}{2 \cdot \rho_o P_{ам} \ln(R_k / r_f)} \cdot \ln(r / r_c) \quad (5)$$

при $r_c \leq r \leq r_f$.

2. Градиент давления в зоне закачиваемой пены найдем, дифференцируя уравнение (5):

$$\frac{\partial P_n}{\partial r} = - \frac{\eta_o \cdot (P_c^2 - P_k^2)}{2 \cdot \rho_o P_{ам} \ln(R_k / r_f)} \cdot \frac{1}{r} \quad (6)$$

3. Скорость фильтрации пены определяется из закона Дарси:

$$w_n = - \frac{k \cdot (P_c^2 - P_k^2)}{2 \eta_z \rho_o P_{ам} \ln(R_k / r_f)} \cdot \frac{1}{r} \quad (7)$$

4. Закон движения границы раздела СЖ–Г r_f определяется из соотношения между скоростью фильтрации пены и средней скоростью движения:

$$t = \frac{m \cdot \eta_z \cdot \rho_o \cdot P_{ам}}{k \cdot (P_c^2 - P_k^2)} \times \left[R_o^2 \cdot \ln \frac{R_k}{R_o} - r_c^2 \cdot \ln \frac{R_k}{r_c} + \frac{1}{2} (R_o^2 - r_c^2) \right] \quad (8)$$

С другой стороны время продвижения пены по газоносному пласту равно времени закачки порции пены:

$$t_{зак} = \frac{V_n}{Q} = \frac{m \cdot \pi \cdot h \cdot (R_o^2 - r_c^2)}{Q} \quad (9)$$

при этом:

$$Q = Q_{пож} + \frac{Q_z \cdot P_{зак}}{P_c}, \quad (10)$$

где Q – расход пены в забойных условиях, м³/с; $P_{зак}$ – давление закачки газа, м³/с.

Приравняв выражения (8) и (9), получим равенство, из которого можно оп-

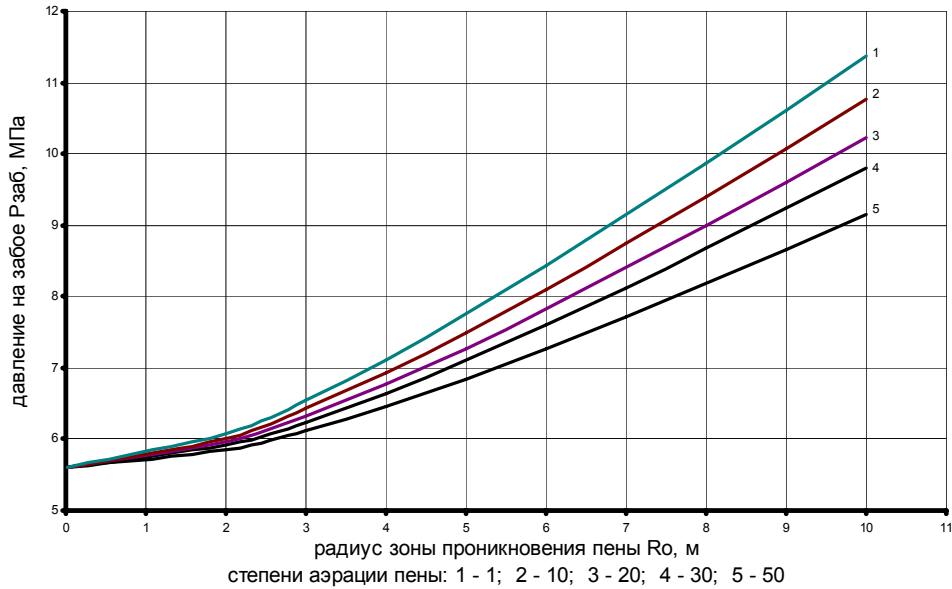


Рис. 2. Зависимость забойного давления при закачке пены в пласт от радиуса зоны проникновения

ределить необходимое давление закачки порции пены и необходимую плотность закачиваемой пены:

- необходимое давление закачки:

$$P_c = P_{заб} = \sqrt{\frac{Q \cdot \eta_c \cdot \rho_n \cdot P_{ам}}{\rho_{ам} \cdot k \cdot \pi \cdot h} \cdot \left[\frac{R_o^2 \cdot \ln(R_k/R_o) - r_c^2 \cdot \ln(R_k/r_c) + \frac{1}{2}}{R_o^2 - r_c^2} \right] + P_{нз}^2} \quad (11)$$

при известных R_o , Q , ρ_n ;

- необходимая плотность пены:

$$\rho_n = \frac{(P_c^2 - P_{нз}^2) \cdot \rho_{ам} \cdot k \cdot \pi \cdot h}{Q \cdot \eta_c \cdot P_{ам} \cdot \left[\frac{R_o^2 \cdot \ln(R_k/R_o) - r_c^2 \cdot \ln(R_k/r_c) + \frac{1}{2}}{R_o^2 - r_c^2} \right]} \quad (12)$$

и степень аэрации при известных значениях $P_{заб}$, R_o , Q :

$$\alpha = \frac{\rho_{нож} - \rho_n}{(1/RT)P_{ам} - 2\rho_{нож} + \rho_n} \quad (13)$$

Если известна величина давления на забое (P_c), то выражая толщину пласта через радиус зоны проникновения пены:

$$h = \frac{t_{зак} Q}{\pi \rho_n (R_o^2 - r_c^2)}, \quad (14)$$

и подставляя это выражение в формулу (11), можно решить задачу определения радиуса и толщины зоны проникновения в газоносный пласт пены заданного объема в течение определенного времени закачки:

$$P_c = P_{заб} = \sqrt{\frac{m \cdot \eta_c \cdot \rho_n \cdot P_{ам}}{\rho_c \cdot k \cdot t_{зак}} \cdot \left[R_o^2 \cdot \ln(R_k/R_o) - r_c^2 \cdot \ln(R_k/r_c) + \frac{(R_o^2 - r_c^2)}{2} \right] + P_{нз}^2} \quad (15)$$

Исходя из приведенных выше зависимостей, построены номограммы (рис. 2), позволяющие определять необходимые технологические параметры при расчете процесса закачки пены в пласт, а также производить оперативное изменение технологических параметров непосредственно во время проведения работ на скважине.

Одним из преимуществ ПКО является возможность проведения обработки пласта в газовой (нефтяной) скважине без ее предварительного глушения. После об-

работки освоение скважины происходит в ускоренные сроки и при этом работа компрессора требуется на непродолжи-

тельный период, либо не требуется вообще.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Освоение скважин.* / Булатов А.И., Качмар Ю.Д., Макаренко П.П., Яремийчук Р.С. – М.: Недра. – 1999. – С. 472.

2. *Бекетов С.Б. Димитриади Ю.К.* Математическая модель закачки пены в пласт при бурении и ремонте скважин / Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Спец. вып. «Математическое моделирование и компьютерные технологии». 2004. – Ростов-на-Дону. Ростовский госуниверситет. – С. 131-134.

3. *Бекетов С.Б. Димитриади Ю.К.* Метод тестирования призабойной зоны продуктивного пла-

ста при интенсификации притока угле-водородов. Горный информационно-аналитический бюллетень, № 1. 2005. – М.: МГГУ. – С. 39-41.

4. *Бекетов С.Б.* Технология пенокислотного воздействия на продуктивные отложения с целью интенсификации притока флюидов / Горный информационно-аналитический бюллетень, № 6. 2004. – М.: МГГУ. – С. 56-59.

5. *Басниев К.С., Кочина И.И., Максимов В.М.* Подземная гидромеханика. – М. Недра. – 1993. – С. 316.

Коротко об авторах

Бекетов С.Б. - кандидат технических наук, первый заместитель начальника НТЦ ООО «Кубань-газпром», г. Краснодар.

Косяк А.Ю. – соискатель кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин» СевКавГТУ, генеральный директор ЗАО СП «МеКаМиннефть».

Димитриади Ю.К. – СевКавГТУ.

ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ			
НЕВСКАЯ Нина Ильинична	Геоэкологические аспекты эволюции природных и урбанизированных систем в условиях высокой сейсмической активности (на примере Центральной части Кавказа)	25.00.36	к.г.-мн.н.

