

## 10

### *Другие химические методы*

ПАВ-ва играют большую роль в процессах повышения нефтеотдачи, чем снижение межфазного натяжения. Они могут использоваться для изменения смачиваемости, могут способствовать образованию эмульсии, уносу, снижению вязкости в объеме фазы и стабилизации дисперсий. В этой главе мы рассмотрим два химических метода, в основе которых, так же как и в случае мицеллярно-полимерного заводнения, лежит эффективное использование ПАВ.

Первый метод – нагнетание в пласт пены – использует ПАВ для снижения подвижности газообразной фазы за счет образования устойчивой газожидкостной пены. Снижение межфазного натяжения не имеет в данном случае большого значения. При щелочном заводнении – второй рассматриваемый здесь метод – снижение межфазного натяжения имеет большое значение, но ПАВ образуется в пласте, в отличие от мицеллярно-полимерного заводнения. Щелочное заводнение очень напоминает мицеллярно-полимерное заводнение по важности фазового поведения. В случае как пенного, так и щелочного заводнения, требуется понимание природы и характера действия ПАВ (см. Раздел 9-2).

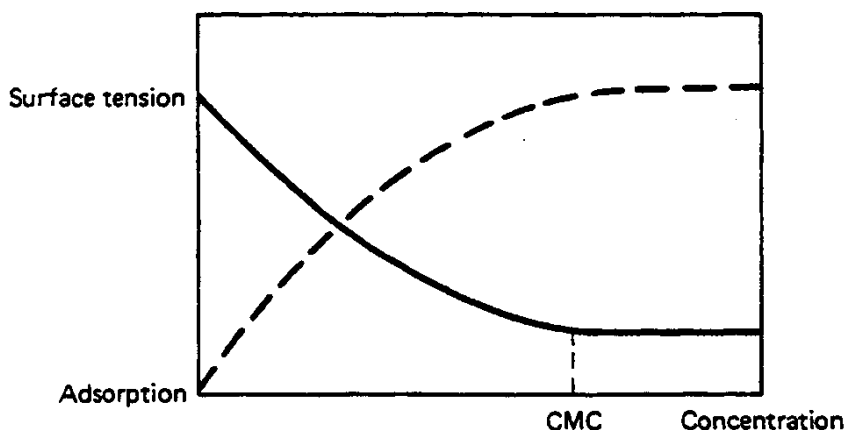
#### **10-1 Нагнетание в пласт пены**

Газожидкостные пены являются альтернативой полимерам в вопросе обеспечения регулирования подвижностей в процессе мицеллярных заводнений. Кроме того, что, вероятно, более важно, пены могут использоваться в качестве агентов, регулирующих подвижность, в смешивающихся заводнениях и в обработках скважин, и уже предлагались, и испытывались на промысле в термозаводнениях. Т.к. большинство свойств пены возникает из добавления в водную фазу ПАВ, и основные моменты, связанные с этими реагентами, приведены в Разделе 9-2, мы посвятим часть этой главы рассмотрению вопроса применения пен во всех процессах повышения нефтеотдачи.

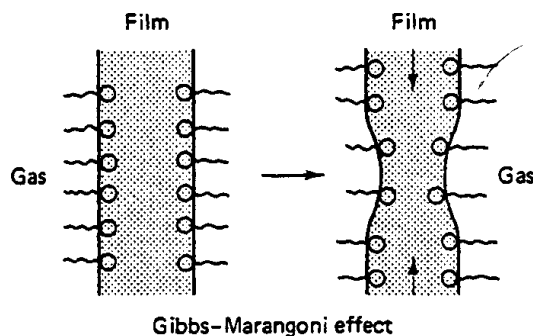
Пены представляют собой дисперсии газовых пузырьков жидкости. Такие дисперсии, как правило, довольно нестойкие и быстро разрушаются в очень короткий промежуток времени. Но если в жидкость добавить ПАВ, стабильность сильно возрастает так, что некоторые пены могут существовать бесконечно долго. ПАВ, применяемые в качестве пенообразующих агентов, обладают многими свойствами, описанными для случая мицеллярно-полимерного заводнения. В случае применения водных пен желательно, чтобы ПАВ имело несколько меньший молекулярный вес, чтобы повысить его растворимость в воде. Фрайд (1960) и Паттон (1981) дают большой перечень ПАВ, которые обладают способностью регулировать подвижность. Несомненно, можно предположить, что эти ПАВ обладают также и многими нежелательными свойствами, которые присуще ПАВ, используемым для мицеллярно-полимерного заводнения, в частности чувствительностью к действию сильно минерализованной воды, температуре, типу нефти и удерживанию.

### 10-2 Стойкость пены

Вопрос стабильности пены можно рассмотреть на примере пленки жидкости, разделяющей два пузырька воздуха, что в разрезе показано на Рис.10-1(b). Полярные головные группы ПАВ ориентированы во внутрь пленки, а неполярные хвосты – в направлении основной массы газовой фазы. За исключением, возможно, случая плотных углеводородных газов, хвостовые части фактически не находятся во внешней жидкости, как показано, но большинство молекул ПАВ ориентировано, как показано, именно во внутреннюю часть границ пленки.



(a) Поверхностное натяжение и адсорбция ПАВ в зависимости от концентрации

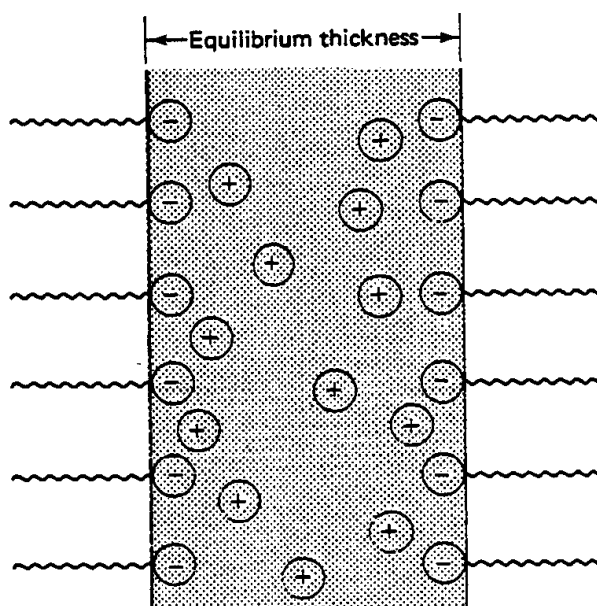


Эффект Гиббса – Марангони

Рис.10-1 Механизм стойкости пленки (Овербик, 1972)

Рис.10-1(a) показывает, что поверхностное натяжение на границе раздела газа и жидкости является убывающей функцией адсорбции ПАВ, которая определяется по разности между концентрацией на поверхности и в объеме. Предположим, что какая-то внешняя сила заставляет пленку истончаться, как показано на Рис.10-1(b). Площадь поверхности пленки в этом месте увеличивается, вызывая уменьшение концентрации ПАВ на поверхности и увеличение поверхностного натяжения. Это увеличение создает разницу в поверхностном натяжении вдоль границ пленки и заставляет пленку восстановить свою первоначальную конфигурацию. Это восстановление называется эффектом Гиббса - Марангони (Овербик, 1972). Несомненно, поверхностное натяжение на границах раздела газа и жидкости играет важную роль в стойкости пен. Очень низкие поверхностные натяжения были бы неблагоприятным фактором; к счастью, поверхностные натяжения на границах раздела газа и жидкости редко бывают меньше, чем 20 мН/м, даже при использовании самых лучших пенообразующих ПАВ. При отсутствии внешних сил пленка находится в состоянии равновесия, что обусловлено балансом между силами отталкивания электрического слоя внутри границ пленки и вандер-ваальсовыми силами притяжения между молекулами в пленке (Рис.10-2).

Вышеупомянутое может быть изложено на основе давления в пленке. В этом и во всех последующих аналогичных аргументах мы принимаем давление в газовой фазе постоянным благодаря ее относительно низкой плотности (если пена находится в статическом состоянии) или низкой вязкости (если пена находится в движении). Т.к. капиллярное давление обратно пропорционально кривизне границы раздела, давление в истонченной части пленки ниже, чем в соседней плоской части. Это обуславливает перепад давления в истонченной и не истонченной частях в пленке, в потоке и восстановление.



**Рис.10-2** Электрический двойной слой в пленке ведет к отталкиванию между поверхностями (Овербик, 1972)

### ***Самопроизвольное разрушение пены***

Если пленка становится значительно меньше толщины при равновесии, пленка разрушится. Утончение может произойти самопроизвольно под действием нескольких механизмов.

Обычно распределение по размерам пузырьков воздуха, присутствующих в пене, неравномерное. Т.к. капиллярные силы обратно пропорциональны кривизне границы раздела, у маленьких пузырьков будет более высокое давление, чем у больших пузырьков. Эта разность давлений вызывает разность химических потенциалов, что в свою очередь

заставляет газ диффундировать через жидкость от маленьких к большим пузырькам. Небольшие пузырьки, в конце концов, исчезают, а пленки, окружающие крупные пузырьки, истончаются до того момента, когда они (пузырьки) разрушаются. Этот процесс усиливается в широком диапазоне размеров пузырьков и при большой растворимости и высоком коэффициенте диффузии газа в жидкой фазе. Поэтому, пены, приготовленные из газов, которые имеют низкую растворимость в воде, например, азота, будут более стойкими, чем пены, приготовленные из газа, обладающего повышенной растворимостью, например, углекислого газа.

Вторым фактором, способствующим утончению пленки, является дренаж жидкости из пленки в результате воздействия внешних сил. На ранней стадии дренаж обусловлен главным образом силой тяжести в тех местах, где пленки относительно толстые, и границы пленки равномерно искривлены. На более поздних стадиях ранее сферические пузырьки газа приобретают полиэдральную форму, и между кривизной границ по бокам пузырьков и в местах соединения пленок возникают большие разности давления. Эти места соединения называются *границами пологого участка кривой*, и большая кривизна на границе означает, что места соединения имеют локально низкое давление. Разность давлений между стороной пленки и местами соединения дополнительно ускоряет разрушение пленки.

Эти факторы, в конечном счете, вызывают самопроизвольное разрушение пены. Паттон и др. (1981) сообщают о скорости самопроизвольного разрушения большого количества пен, как о функции типа используемого ПАВ, температуры и рН. Время полураспада пен в их статических испытаниях колеблется от 1 до 45 мин. Они сообщают, что анионные ПАВ имеют большую стойкость, чем неионогенные, и что на стойкость сульфонатных пен сильно влияет жесткость воды. Пены, как правило, были менее стойкими при высоких температурах, и повысить стойкость многих из них можно было, только добавив содетергент.

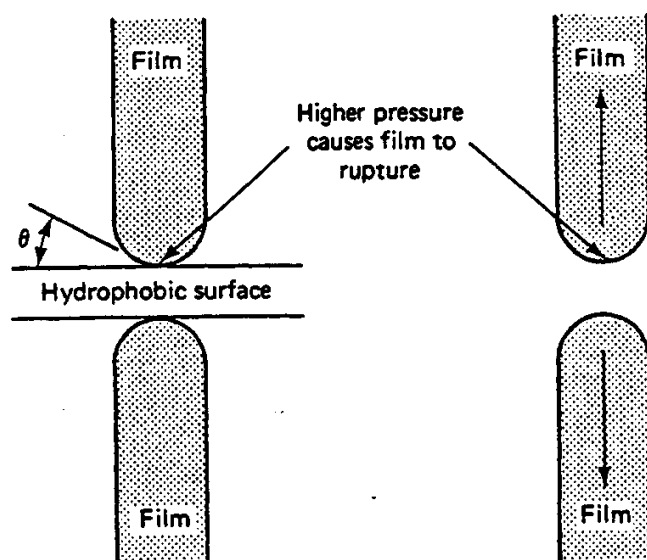
### ***Индукцированное разрушение***

Кроме этих механизмов самопроизвольного разрушения, несколько внешних эффектов также являются причиной разрушения газожидкостной пленки.

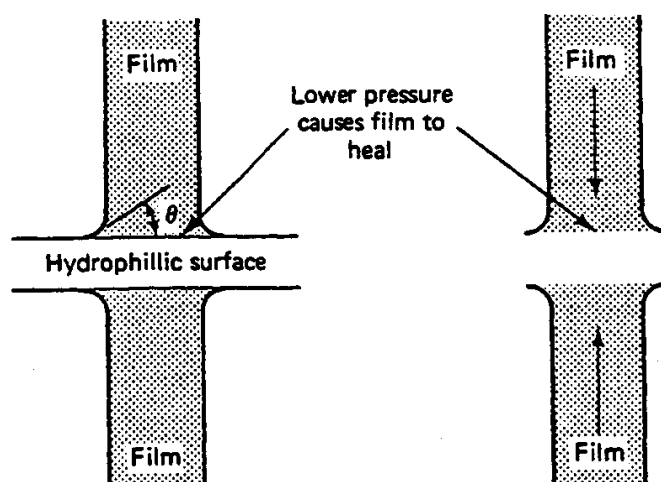
Локальное нагревание вызывает локальное уменьшение поверхностного поглощения, что приводит к разрушению пленки в манере, противоположной стабилизирующему влиянию эффекта Гиббса – Марангони (Рис.10-1).

Добавление в жидкость определенных ПАВ (пеногасителей) заменяет молекулы на поверхности (Рис.10-2) молекулами, которые не содействуют в достаточной мере силам отталкивания удерживать пленку в стабильном состоянии. В определенных условиях эту функцию может выполнять нефть, и движущей силой может быть изменение электролитного баланса.

Если пленка водной пены соприкасается с гидрофобной поверхностью (Рис.10-3а), получаемый краевой угол смачивания и кривизна вызывают перепад давлений на некотором расстоянии от точки касания. Когда исчезает контакт с поверхностью, эта разность давлений заставляет пленку быстро переместиться назад, что приводит к разрушению пленки. При таком же эксперименте, проводимом с гидрофильной поверхностью, пленка восстанавливалась, когда убирался контакт с поверхностью (Рис.10-3б). Таким образом, в гидрофобной проницаемой среде, вероятнее всего, образовать водные пены будет трудно. Для этих применений желательнее использовать oleиновые пены.



(a) Контакт с гидрофобной поверхностью



(b) Контакт с гидрофильной поверхностью

**Рис.10-3** Влияние твердой поверхности на стойкость пены

### 10-3 Критерии, используемые для характеристики пен

С физической точки зрения пены характеризуются по трем критериям.

1. *Качество* – объем газа в пене, выраженный в виде процента или доли от общего объема пены. Качество может изменяться в зависимости от температуры и давления, т.к. объем газа может меняться, и газ, растворенный жидкой фазе, может выйти из раствора. Качество пены может быть довольно высоким, во многих случаях достигая 97%. Пена, имеющая качество выше 90%, является обезвоженной пеной. Это определение качества согласуется с определением, приведенным в Разделе 3.2 для двухфазных равновесий.
2. Средний размер пузырьков, именуемый *текстурой* пены. Диапазон текстур большой: от коллоидного размера (0.01 – 0.1 мкм) до размера макроэмульсии. На Рис.10-4 показано типичное распределение пузырьков пены по размерам. Текстура

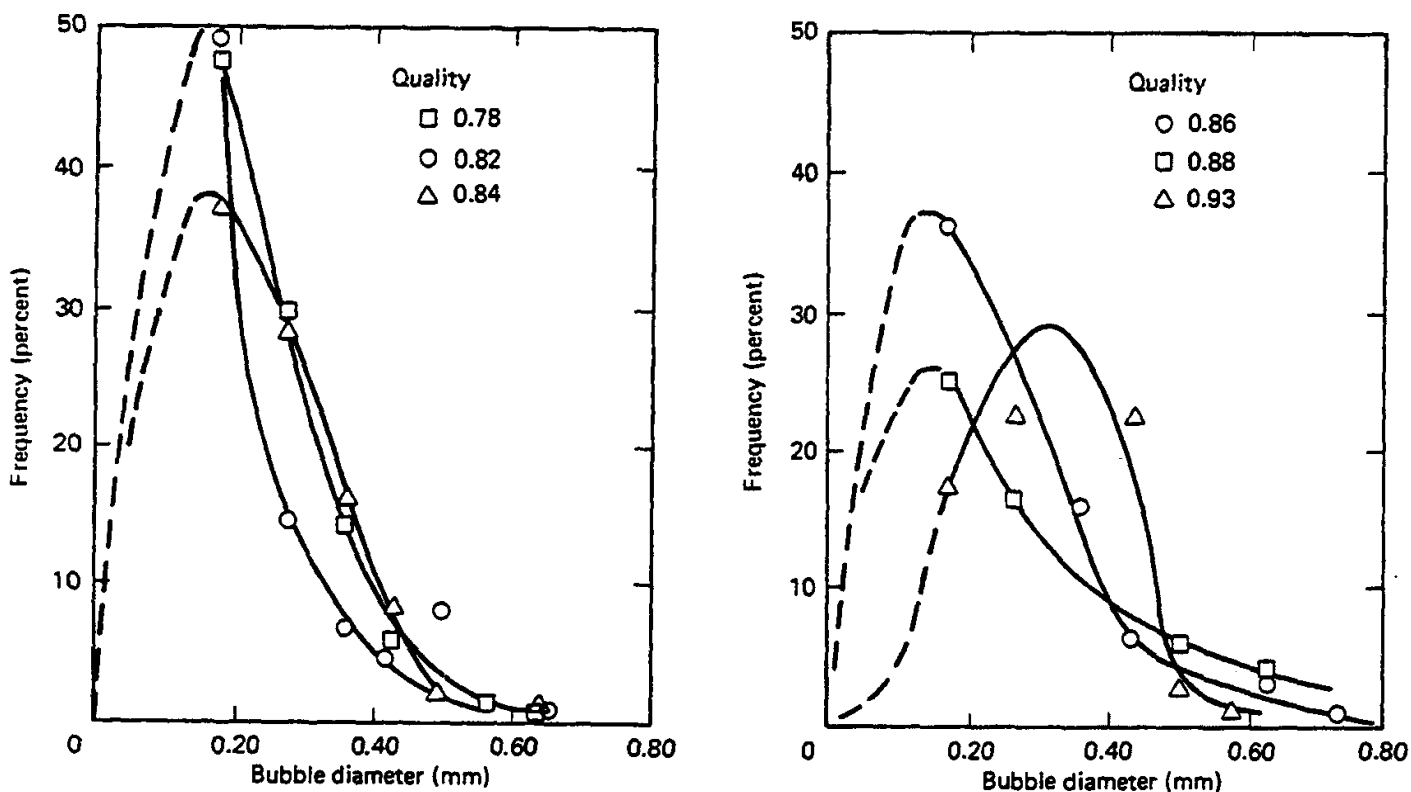


Рис.10-4 Частотное распределение пузырьков по размерам (Дэвид и Марсен, 1969)

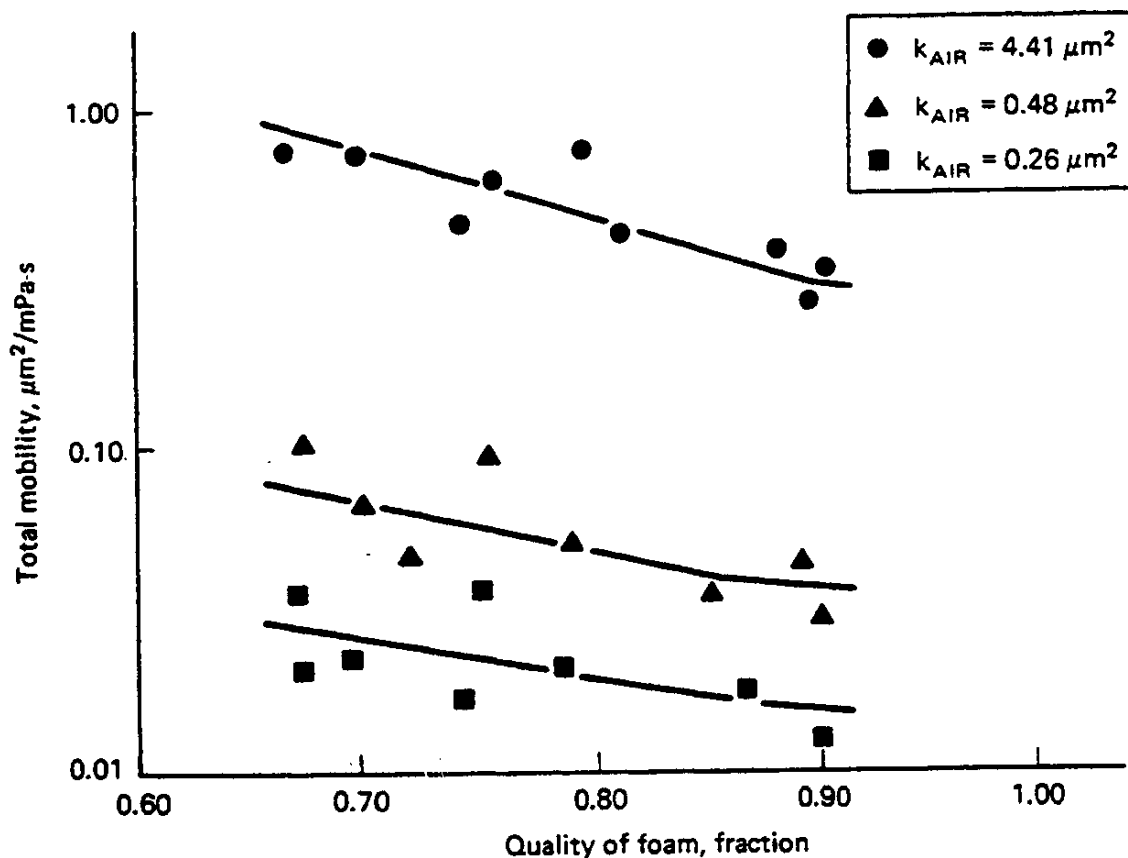
определяет как пена будет течь через проницаемую среду. Если средний размер пузырьков гораздо меньше диаметра пор, пена течет как диспергированные пузырьки в поровых каналах. Если средний размер пузырьков больше порового диаметра, течение пены представляет собой продвижение пленок, разделяющих отдельные пузырьки газа. Учитывая типичные текстуры пен и размеры пор, последнее условие в большей степени близко к реализации, особенно для пен высокого качества. Сравните Рис.3-7 и 10-4.

3. Разброс пузырьков по размерам. Как уже упоминалось, пены с большим разбросом размеров пузырьков, вероятнее всего, являются нестойкими.

Несомненно, вы отметили параллели между этими критериями пены и локальными свойствами проницаемой среды. Качество пены – это аналог пористости, текстура - среднего размера пор, а распределение пузырьков по размерам – распределения пор по размерам. Многие из свойств потока пены в проницаемой среде можно объяснить, сравнивая относительные размеры аналогичных величин.

#### 10-4 Снижение подвижности

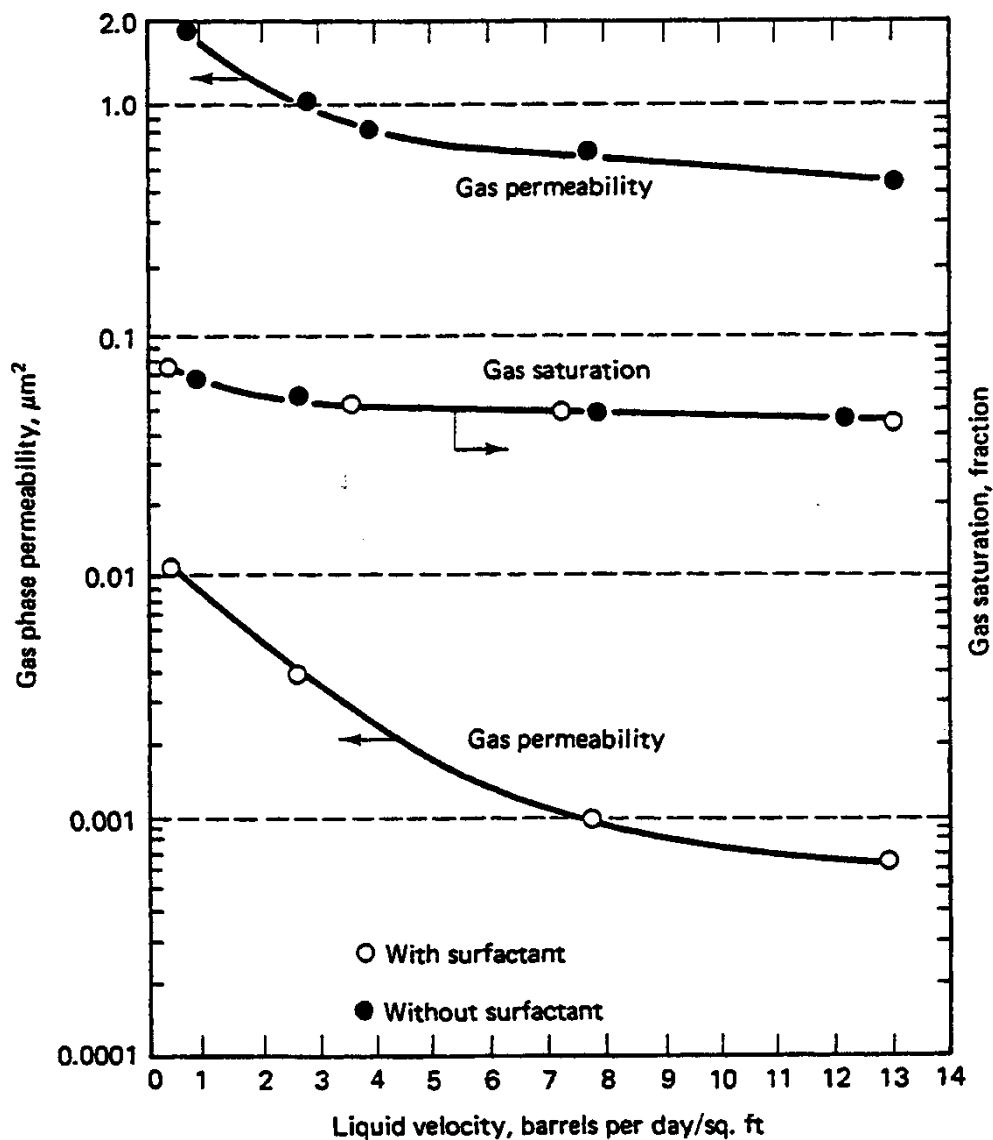
Пены, текущие в проницаемой среде, могут очень сильно уменьшать подвижность газовой фазы. Данные, приведенные на Рис.10-5 иллюстрируют этот эффект. На этом рисунке показана установившаяся подвижность пен различного качества в кернах песчаника Бириа



**Рис.10-5** Соотношение эффективной проницаемости – вязкости в зависимости от качества пены для случая цементированной проницаемой среды и 0.1% аэрозольной пены (Хан, 1965)

при трех разных проницаемостях. Отмеченные подвижности меньше подвижности однофазной воды (это должно быть несколько меньше, чем проницаемости по воздуху, показанные на рисунке) и значительно меньше подвижности газовой фазы. Таким образом, подвижность пены ниже, чем подвижность каждой из ее составляющих. Подвижность пены уменьшается с повышением качества до тех пор, пока пленки между пузырьками газа не начинают разрушаться. В этой точке (на Рис.10-5 не показана) пена разрушается, и подвижность возрастает до подвижности газа. Пены эффективны в снижении подвижности при всех трех проницаемостях, показанных на Рис.10-5, но эффект качества пены относительно более выражен при самой большой проницаемости. Это следствие несоразмерности текстуры пены и среднего порового размера среды (Фрайд, 1960).

Уменьшение подвижности, обусловленное пеной, можно пронаблюдать в виде повышения вязкости однофазного потока или уменьшения проницаемости по газовой фазе. В первом случае эффективную вязкость получаем путем деления замеренной подвижности на однофазную газопроницаемость. Во втором случае проницаемость газовой фазы следует из умножения замеренной подвижности на вязкость газа. Рис.10-6 показывает представительные данные второго типа; он показывает проницаемость по газовой фазе в присутствии и отсутствии пены, и насыщенность газом, представленную в виде графика зависимости от скорости закачки жидкости. По сравнению с вытеснением, проводившемся без ПАВ, пена вызывает значительное уменьшение газопроницаемости при той же самой скорости течения и даже при той же газонасыщенности (средняя кривая). С другой стороны, Рис.10-7 показывает, что ни газонасыщенность, ни присутствие пенообразующего агента не влияет на относительную проницаемость для водной фазы.



**Рис.10-6** Воздействие скорости течения жидкости и газонасыщенности в присутствии и отсутствии ПАВ (Бернард и Холм, 1964)

Предполагается, что низкие подвижности в пене обусловлены, по меньшей мере, двумя разными механизмами: (1) образованием или увеличением насыщенности уловленной остаточной газовой фазы и (2) закупоркой поровых сужений под действием газовых пленок. Из Рис.10-6 видно, что влияние уловленной газонасыщенности, которая снижает подвижность за счет снижения относительной проницаемости, гораздо меньше эффекта блокирования порового сужения. Но эффект уловленной газонасыщенности может стать важным на последних этапах вытеснения, когда более низкие давления могут привести к выходу газа из раствора.

Снижение подвижности пен, проявляющиеся в виде увеличения вязкости, было исследовано на капиллярных трубках (Холбрук и др., 1981). На Рис.10-8 представлены данные этого типа. На графике зависимости касательного напряжения от скорости сдвига, построенного в двойном логарифмическом масштабе, угол наклона 1 показывает ньютоновскую жидкость (см. уравнение 8В-3 при  $n_{pl} = 1$ ). Пены, представленные на Рис.10-8 все имеют угол наклона кривой меньше 1, что указывает на поток, характеризуемый псевдопластичностью или сдвиговым разжижением. Уровень этих кривых на таком графике показывает общее сопротивление течению в виде показателя степени степенного закона.



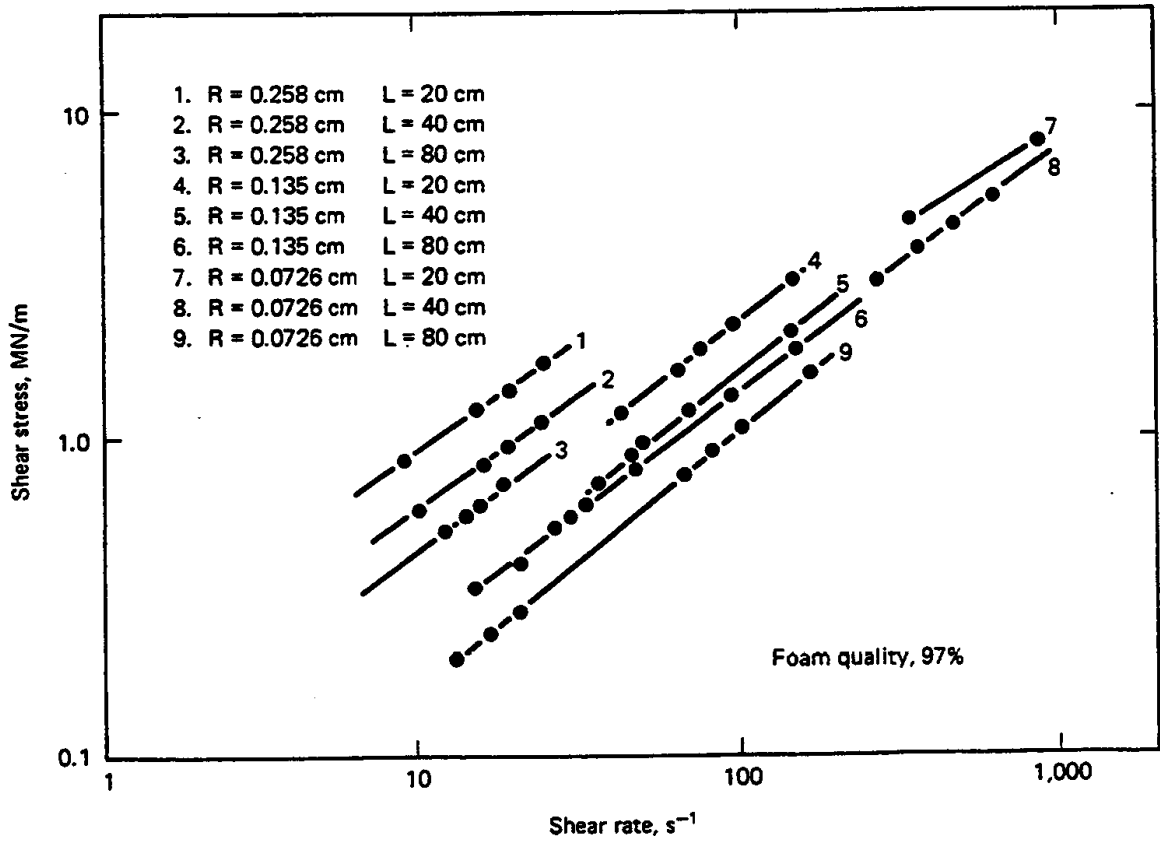


Рис.10-7 Влияние пенообразующего агента на относительную проницаемость по воде (Бернард и др., 1965)

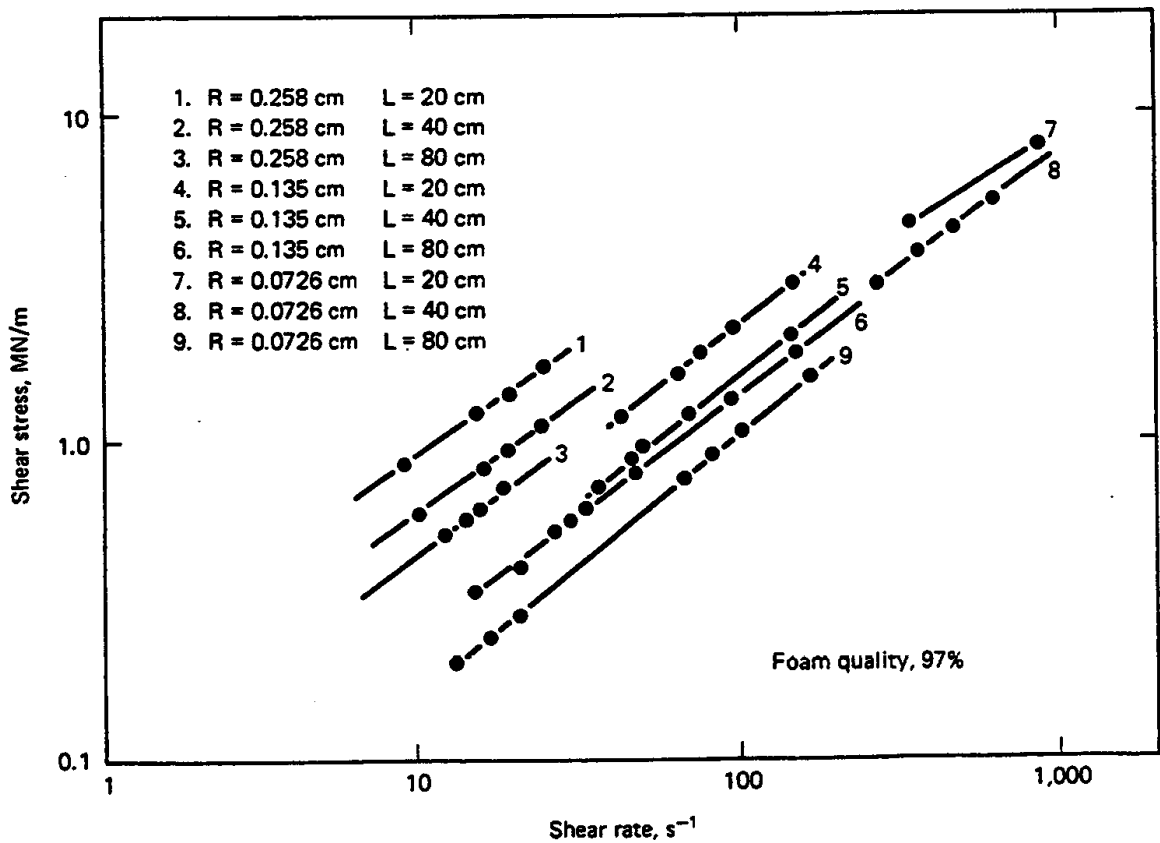


Рис.10-8 Зависимость касательного напряжения от скорости сдвига для потока пены в капиллярных трубках (Паттон и др., 1981)

Общий коэффициент самый большой в трубках с большим радиусом, так же как и эффект уменьшения подвижности был наиболее ярко выражен в кернах с самой высокой проницаемостью (Рис.10-5). Рис.10-8 также показывает зависимость от длины трубки, что, вероятно, является результатом частично разрушающейся пены.

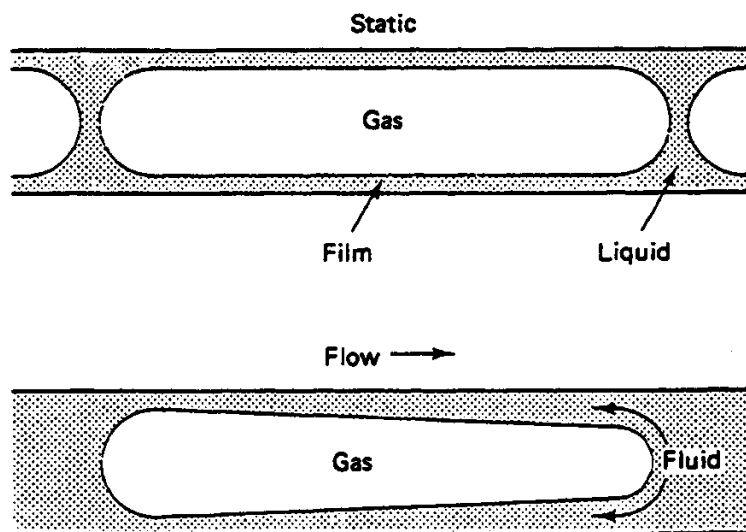
Реологические свойства пен в капиллярных трубках лучше всего проанализировать на примере течения одного пузырька (Рис.10-9). В статических условиях пленка была бы нестойкой из-за перепада межфазного натяжения, как рассматривалось выше. В условиях потока вязкостные силы толкают жидкость в слой проскальзывания между стенкой трубки и внутренней границей пленки, так что пузырек в какой-то степени удлиняется, а толщина пленки, как правило, больше, чем когда пузырек находился в статическом состоянии. Используя теоретические аргументы, в основе которых лежит ньютоновская жидкость и невязкий газ, Хирасаки и Лоусон (1983) показали, что толщина пленки возрастает в степени 2/3 с увеличением скорости движения пузырька. При отсутствии скольжения в капилляре с неизменным пузырьком, продвигающимся по трубке со скоростью  $v$ , зависимость между силой  $F$ , необходимой для того, чтобы привести в движение пузырек, и  $v$  следующая:

$$\frac{F}{A} = \frac{\mu \cdot v}{\Delta r} \quad (10.4.1)$$

где  $\Delta r$  - толщина пленки, а  $A$  – площадь контакта между пленкой и стенкой трубки. Используя результаты теории Хирасаки и Лоусона и найдя вязкость в уравнении (10.4-1), получаем пропорциональность:

$$\frac{F}{A} \sim \mu \cdot v^{1/3} \quad (10.4-2)$$

Эта зависимость прогнозирует, что кажущуюся вязкость  $F/A_v$  пены, текущей в капиллярной трубке, уменьшается с увеличением скорости. Тем самым подразумевается, что эффект сдвигового разжижения, наблюдаемый в капиллярных трубках, фактически является следствием уплотнения пленки по мере увеличения скорости. Поэтому, нужно быть очень осторожным при интерпретации данных, полученных в опытах на капиллярных трубках, применительно к свойствам проницаемой среды. Второй вывод уравнения (10.4-2) заключается в том, что текстура пены, которая определяет



**Рис.10-9** Поведение пузырька пены в статических условиях и в условиях течения в капиллярной трубке (Хирасаки и Лоусон, 1983)

пространство между пленками и А, имеет еще большее значение для определения реологических свойств, чем качество пены.

### 10-5 Щелочное заводнение

Вторым химическим процессом повышения нефтеотдачи является процесс, во время которого производится закачка агента с высоким рН, или щелочное заводнение, схематическое изображение которого представлено на Рис.10-10. Как и в процессе полимерного и мицеллярно-полимерного заводнения, в этом случае обычно производится предварительная промывка водой, позволяющая создать нужные условия, затем закачивается определенный объем нефтевытесняющего химреагента и буферная вытесняющая оторочка с меняющейся подвижностью; кроме того, весь процесс, как правило, вытесняется продавочной водой. При закачке и агента с высоким рН, и в мицеллярно-полимерном заводнении, закачивают ПАВ, при заводнении агентом с высоким рН ПАВ образуется в пласте.

Высокий рН означает большие концентрации анионов гидроокиси (ОН<sup>-</sup>). рН идеального водного раствора определяется как

$$pH = -\log[H^+] \quad (10.5-1)$$

где концентрация ионов водорода [H<sup>+</sup>] дается в кг-моль/м<sup>3</sup> воды. По мере того, как концентрация ОН<sup>-</sup> возрастает, концентрация Н<sup>+</sup> уменьшается, т.к. две концентрации связаны через диссоциацию воды

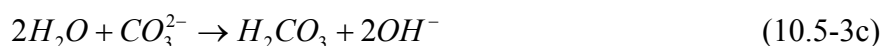
$$K_1 = \frac{[OH^-][H^+]}{[H_2O]} \quad (10.5-2)$$

а концентрация воды в водной фазе почти постоянна. Эти размышления подсказывают два способа введения высокого рН в пласт: диссоциация гидроксилсодержащих видов или добавление реагентов, которые избирательно связывают ионы водорода.

Для создания условий высокого рН можно было бы использовать многие химреагенты, но наиболее распространенным для этого являются гидроокись натрия (каустическая сода или NaOH), ортосиликат натрия и карбонат натрия (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). NaOH образует ОН<sup>-</sup> путем диссоциации



а два последних – путем образования слабо диссоциирующих кислот (кремниевой и угольной кислоты, соответственно), которые удаляют из раствора свободные ионы Н<sup>+</sup>.



для карбоната натрия.

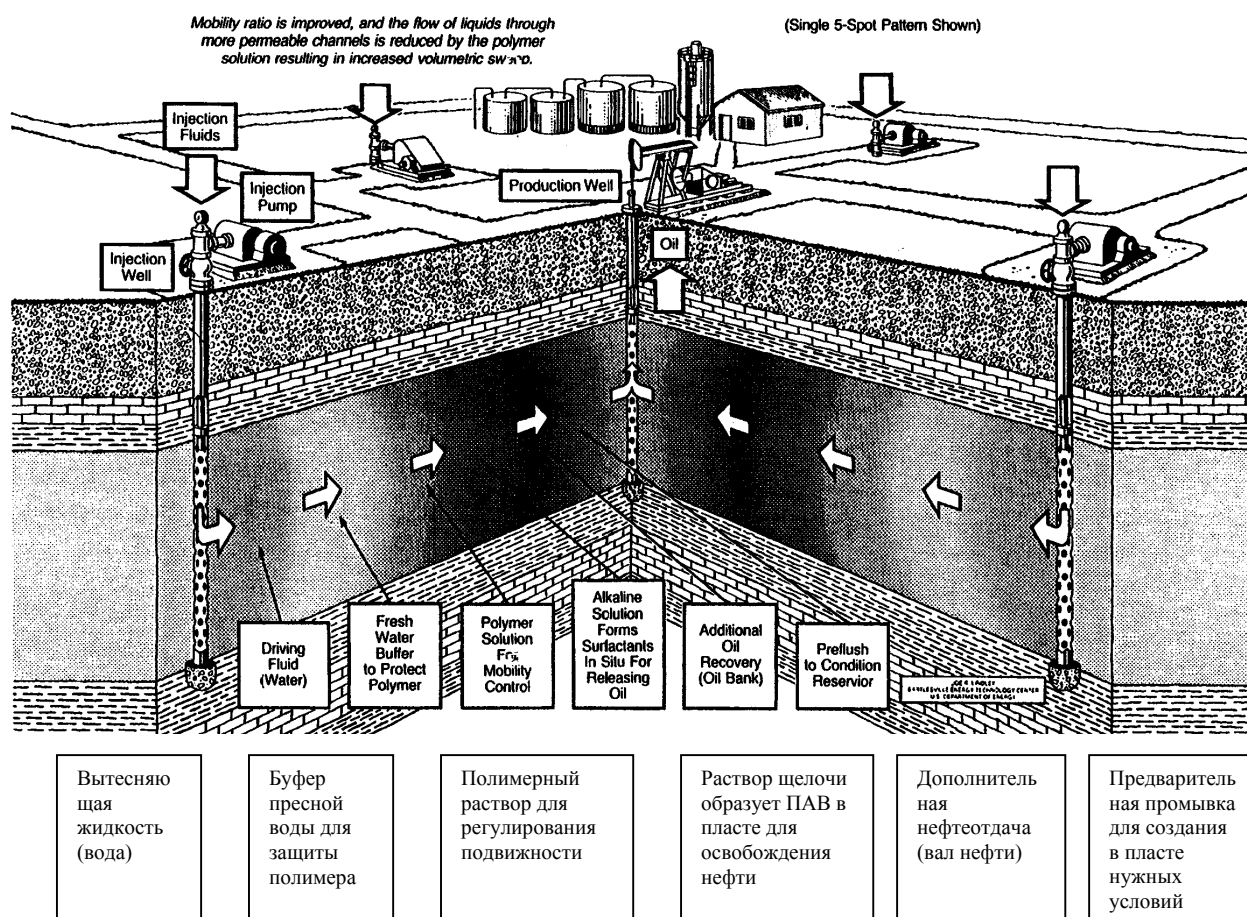
Химреагенты с высоким рН, как правило, использовались на промысле в концентрациях до 5 вес % (закачиваемые рН – 11-13) при размере оторочки до 0.2 объема пор. Они дают количество реагента, вполне сопоставимое с применением ПАВ в мицеллярно-полимерном заводнении; однако реагенты с высоким рН значительно дешевле.

## (Щелочное заводнение)

Для осуществления представленного метода требуется предварительная промывка, чтобы создать в пласте нужные условия, затем следует закачка щелочи или щелочно-полимерного раствора, обеспечивающего регулирование подвижности, и закачка вытесняющей жидкости (воды) для вытеснения реагентов и образующегося нефтяного вала к добывающим скважинам.

*Соотношение подвижностей улучшено, и поток жидкостей через более проницаемые каналы уменьшается за счет действия полимерного раствора, применение которого приводит к повышению охвата пласта по объему.*

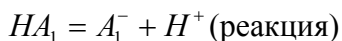
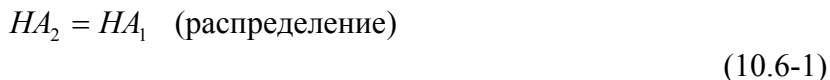
(На рисунке представлена пяти-точечная схема размещения скважин)



**Рис.10-10** Схематическое изображение щелочного заводнения (рисунок Джо Линдлея, Департамент Энергетики США, Бартлесвилл, Оклахома)

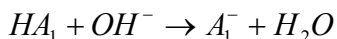
## 10-6 Образование ПАВ

Сама по себе  $\text{OH}^-$  не является ПАВ, т.к. отсутствие липофильного хвоста делает ее всецело растворимой в воде. Если сырая нефть содержит кислотный углеводородный компонент  $\text{HA}_2$ , какая-то его часть,  $\text{HA}_1$ , может распределиться в водную фазу, где она может прореагировать (согласно Рамакришнану и Уоссану, 1982) следующим образом:



Хотя точная природа  $\text{HA}_2$  неизвестна, вероятно, она сильно зависит от типа сырой нефти. Недостаток ионов водорода в водной фазе обуславливает распространение этой реакции вправо. Анионные виды  $\text{A}_1^-$  являются ПАВ, которое может обладать многими свойствами и быть составной частью большинства явлений, которые мы рассматривали в Главе 9 (Мицеллярно-полимерное заводнение).

Если изначально  $\text{HA}_2$  не присутствует в сырой нефти, то в этом случае может образоваться мало ПАВ. Использование кислотного числа - является эффективной методикой определения характеристики сырых нефтей на предмет того, насколько они привлекательны для щелочного заводнения. Кислотное число - это количество (в мг) гидроксида калия (KOH), требуемое для нейтрализации одного грамма сырой нефти. Чтобы сделать это измерение, сырая нефть экстрагируется водой до тех пор, пока не будут удалены кислотные виды  $\text{HA}_2$ . Затем водная фаза, содержащая  $\text{HA}_1$ ,  $\text{A}_1^-$  и  $\text{H}^+$ , доводится до  $\text{pH} = 7$  путем добавления KOH



Чтобы получить величину, поддающуюся интерпретации, сырая нефть не должна содержать кислотных добавок (например, ингибитора образования отложений) и кислых газов ( $\text{CO}_2$  или  $\text{H}_2\text{S}$ ). Хорошим кандидатом для щелочного заводнения считается сырая нефть, имеющая кислотное число 0.5 мг/г или выше, но кислотные числа, равные 0.2 мг/г могут также представлять интерес, т.к. в этом случае потребуется небольшое количество ПАВ для насыщения поверхностей раздела нефти и воды. На Рис.10-11 показана гистограмма кислотных чисел, основанная на работе Дженнингса и др. (1974).

## 10-7 Механизмы вытеснения

Нефтеотдача в процессе заводнения, в котором применяется реагент с высоким pH, приписывается действию восьми отдельных механизмов (де Забала и др., 1982). В этом разделе мы сосредоточимся только на трех из них: снижение межфазного натяжения, изменение смачиваемости и образование эмульсии. Два последних механизма присутствуют также и в мицеллярно-полимерном заводнении, но они подавляются эффектами низкого межфазного натяжения. При меньшей конечной нефтеотдаче в щелочном заводнении различие между эффектами становится существенным.

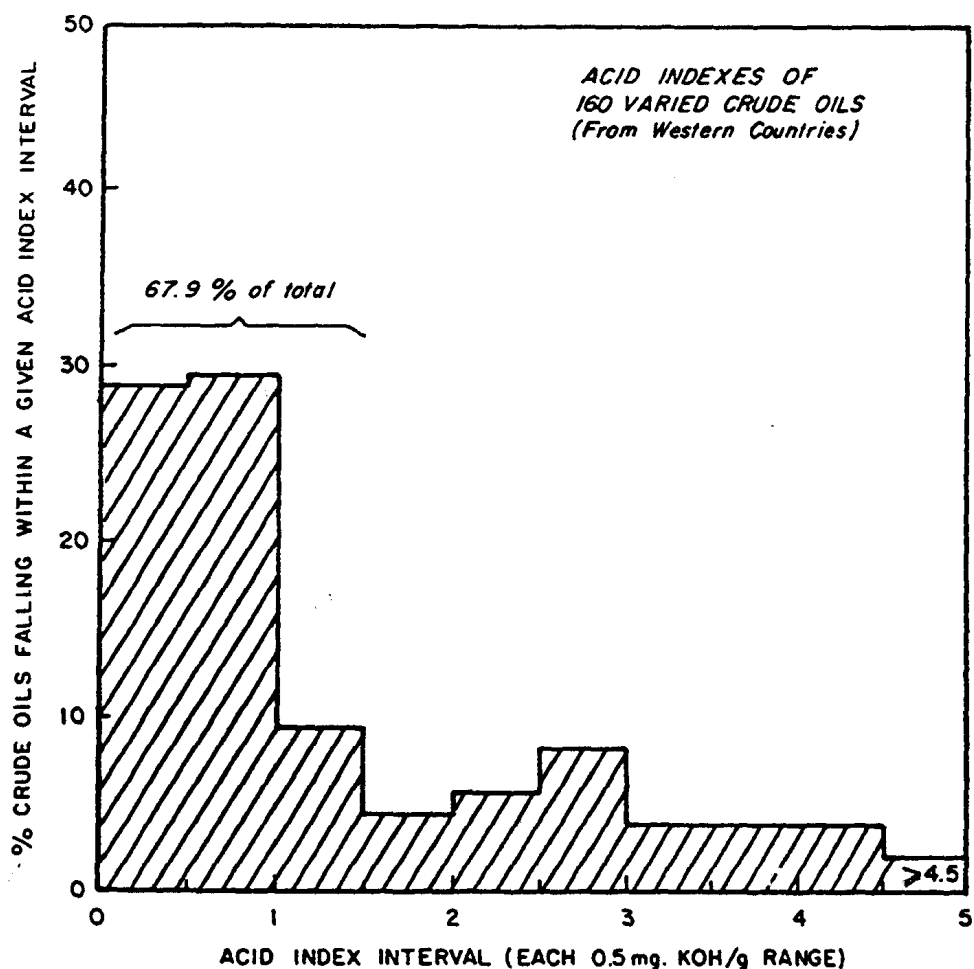
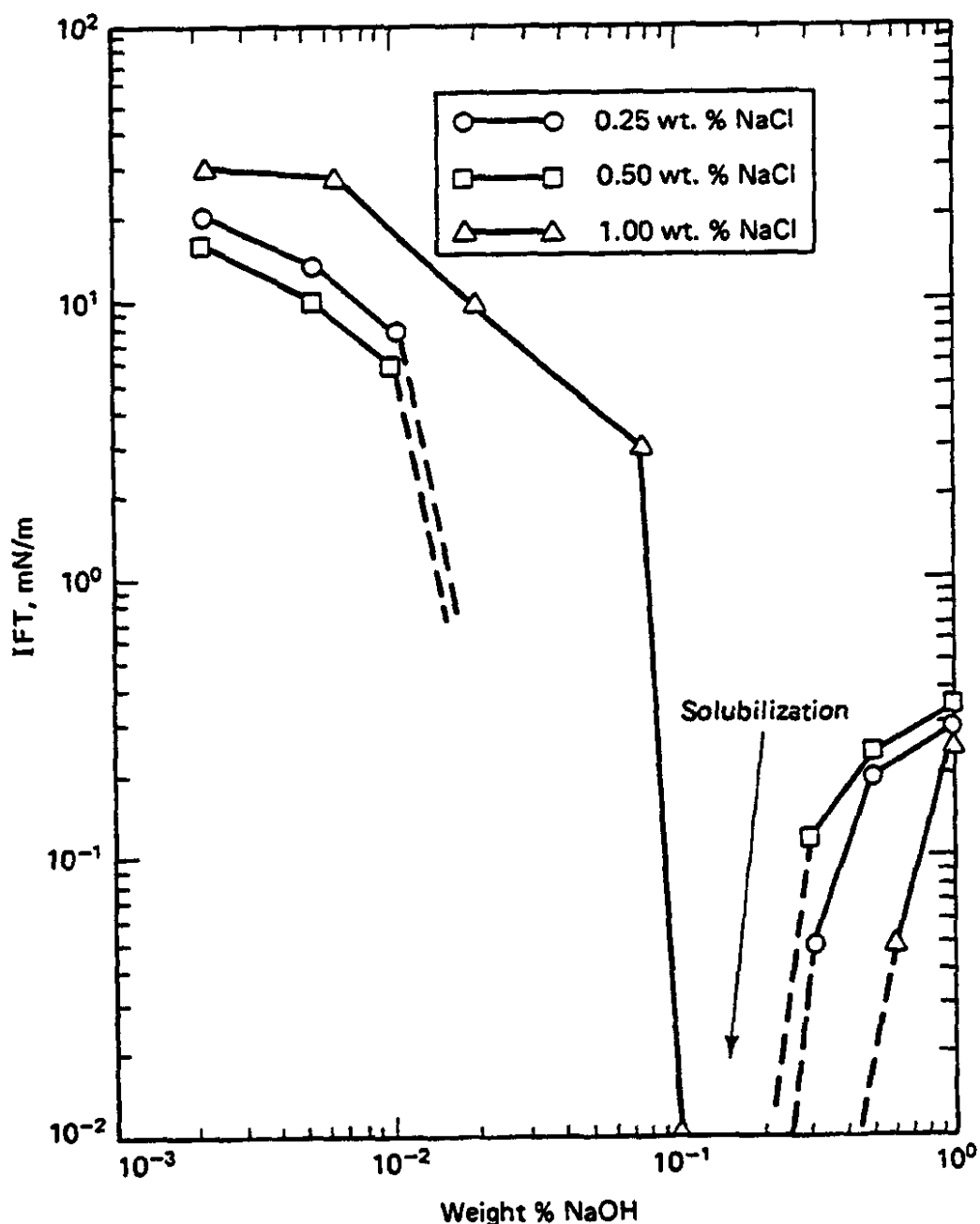


Рис.10-11 Гистограмма кислотных чисел (Минссиаукс, 1976)

### Снижение межфазного натяжения

Образовавшееся ПАВ  $A_1^-$  агрегирует на поверхностях раздела нефти и воды, что может привести к снижению межфазного натяжения (Рамакришнан и Уоссон, 1982). Как правило, это уменьшение межфазного натяжения не столь явно выражено, как в мицеллярно-полимерном заводнении, но при определенных условиях оно может быть достаточно большим, чтобы в результате дать хорошую нефтеотдачу. На Рис.10-12 показаны измерения межфазного натяжения на границе раздела растворов каустической соды и сырой нефти при разных минерализациях. Межфазные натяжения чувствительны как к концентрации NaOH, так и к минерализации, будучи минимальными при концентрациях NaOH - 0.01 - 0.1 вес %. Снижение межфазного натяжения ограничивается в этих опытах спонтанным эмульгированием смеси нефти и воды, когда межфазное натяжение достигает минимума.

Между эффектами низкого межфазного натяжения в мицеллярно-полимерном заводнении и заводнении, в котором применяется реагент с высоким pH, много сходства. Данные на Рис.10-12 свидетельствуют о том, что для раствора NaOH концентрацией 0.03 вес % оптимальной минерализацией является 1.0 вес % NaCl.



**Рис.10-12** Межфазные натяжения для систем каустическая сода – нефть – вода (Рамакришнан и Уоссан, 1982)

(Сравните Рис.10-12 с Рис.9-10.) Действительно, Дженнингс и др. (1974) в экспериментах по определению нефтеотдачи показали, что существует оптимальная концентрация NaOH для заданной минерализации. Кроме того, наличие эффекта эмульгирования при низких межфазных натяжениях – это именно то, чего следует ожидать от мицеллярно-полимерной системы при концентрации ПАВ выше инвариантной точки. Это наводит на мысль о том, что данные на Рис.10-12 показывают, что при низких концентрациях NaOH существует фазовое окружение II(-) типа, а при высоких концентрациях NaOH существуют системы II(+) типа. Требуется дополнительная работа, чтобы окончательно установить связь с фазовым поведением мицеллярно-полимерной системы, т.к. фактическая концентрация ПАВ  $A_1^-$ , вероятно, будет гораздо ниже в щелочной системе. Стилл, Нелсон и др. (1984) показывают, что содетергент может увеличить оптимальную минерализацию в системе также, как и в мицеллярно-полимерных системах.

### ***Изменение смачиваемости***

Оуинс и Арчер (1971) показывают, что повышение гидрофильности приводит к увеличению конечной нефтеотдачи. Сообщалось, что смачиваемость уменьшает угол контакта воды и нефти, замеряемый на полированных синтетических поверхностях. Это было продемонстрировано и другими авторами при использовании реагентов с высоким рН (Вагнер и Лич, 1959; Эрлих и др., 1974). Увеличение нефтеотдачи – это результат действия двух механизмов: (1) эффекта относительной проницаемости, который обуславливает уменьшение соотношения подвижностей при вытеснении и (2) смещения кривой капиллярного осушения.

Кук и др. (1974) сообщал об увеличении нефтеотдачи с повышением гидрофобности. Другие данные показывают, что нефтеотдача максимальна, когда смачиваемость проницаемой среды не является ни сильно гидрофильной, ни сильно гидрофобной (Лоренц и др., 1974). С учетом последних данных, важным фактором может быть изменение смачиваемости, а не конечная смачиваемость среды. В среде с определенной исходной смачиваемостью не смачивающая фаза занимает крупные поры, а смачивающая фаза занимает мелкие поры. Если изменить смачиваемость среды, не смачивающая жидкость будет существовать в мелких порах, а смачивающая жидкость – в крупных. Возникающее в результате перераспределение жидкостей по мере того, как фазы будут стремиться достичь своего естественного состояния, приведет к тому, что обе фазы смогут быть добыты за счет действия вязкостных сил.

### ***Образование эмульсии***

Щелочные реагенты могут привести к увеличению нефтеотдачи за счет образования эмульсий. Образование эмульсии дает дополнительную нефть, по крайней мере, двумя путями: за счет уменьшения отношения подвижностей, т.к. многие из этих эмульсий имеют более высокую вязкость, и за счет солюбилизации и улавливания нефти в текущем водном потоке. Первый механизм повышает коэффициент вытеснения и охвата по объему, как и любой другой агент, регулирующий подвижность. Локальное образование сильно вязких эмульсий нежелательно, т.к. они будут способствовать развитию вязкостной нестабильности. Для щелочного раствора, не содержащего нефти, механизм солюбилизации и улавливания более значителен при низком межфазном натяжении между разбухшей фазой воды и оставшейся сырой нефтью. Рис.10-12 показывает, что при определенных условиях, эмульгирование и низкие межфазные натяжения возникают одновременно. МакОлифф (1973) показал, что эмульсии, закачиваемые в керн, и эмульсии, образующиеся в керне, дают сопоставимую нефтеотдачу.

### ***10-8 Взаимодействия породы и жидкости***

Взаимодействия щелочных реагентов и минералов проницаемой среды могут вызвать значительное замедление распространения этих реагентов по среде. В этом разделе мы рассмотрим три аспекта взаимодействия породы и жидкостей: образование двухвалентных гидроксидных соединений, растворение минералов и катионообмен.



### *Двухвалентные гидроокисные соединения*

Сами по себе ионы  $\text{OH}^-$  не образуют существенных связей с твердыми поверхностями, но в присутствии многовалентных катионов они могут образовывать гидроксильные соединения



которые, будучи относительно нерастворимыми, могут выпадать в осадок. (Растворимость см. в Таблице 3-7.) Эта реакция, в свою очередь, снижает pH раствора и может вызвать ухудшение свойств пласта за счет закупорки пор и перемещения мелких частиц. Анионные виды ПАВ  $A_1^-$  могут взаимодействовать с неорганическими катионами в растворе так же, как и при мицеллярно-полимерном заводнении. Однако взаимодействия с двухвалентными катионами обычно происходят преимущественно в жесткой воде или там, где имеются значительные количества растворимых многовалентных минералов. Из-за этих взаимодействий и взаимодействий, в которых участвуют ПАВ  $A_1^-$ , процессы щелочного заводнения также чувствительны к минерализации и жесткости воды, как и процессы мицеллярно-полимерного заводнения.

### *Растворение минералов*

В отличие от мицеллярно-полимерного заводнения, реагенты с высоким pH могут взаимодействовать непосредственно с минералами глин и кварцевым подслоем, вызывая расход ионов  $\text{OH}^-$ . В процессах вытеснения на ядрах реакции с глинами проявляются вымыванием растворимого алюминия и кремнезема (Банг и Радке, 1982). Получаемые в результате растворимые виды могут вызывать образование значительных осадков за счет реакций с гидроксилами, как в уравнении (10.8-1) (Сиданск, 1983). Скорость расхода гидроксидов из этой “медленной” реакции (катионообмен обычно происходит довольно быстро, так что создается локальное равновесие) определяется следующим образом.

Рассмотрим скорость перемещения ионов гидроокиси, которые взаимодействуют с кремнеземом в проницаемой среде. При условии обычных допущений движения отдельных фаз в многофазовом потоке, концентрация гидроокиси  $C_3$  должна удовлетворять уравнению

$$\phi \frac{\partial C_3}{\partial t} + u \frac{\partial C_3}{\partial x} = r_3 \quad (10.8-2a)$$

в однофазном одномерном потоке. Это уравнение зависит от граничных и исходных условий

$$C_3(x, 0) = C_{3I}, \quad C_3(0, t) = C_{3I} \quad (10.8-2b)$$

Мы рассматриваем только непрерывную закачку, поскольку этого достаточно, чтобы проиллюстрировать важные особенности переноса гидроокиси. (Трактовку для щелочной оторочки см. у Банг и Радке, 1982.)

$r_3$  - скорость расхода ионов гидроокиси в результате следующей реакции



Эта реакция должна рассматриваться как общая реакция, т.к.  $\text{SiO}_2$  не является молекулярной формулой кремнезема, встречающегося в естественных условиях, и из-за этого (2) конечный продукт фактически представляет собой распределение нескольких

возможных продуктов растворимого кремнезема. Однако, уравнение (10.8-3) улавливает суть расхода гидроокиси в реакции как с диоксидом кремния, так и с глинами.

Если, как предположили здесь, раствор недостаточно насыщен относительно наименее растворимого минерала кремнезема, обратная реакция, представленная уравнением (10.8-3а) незначительна, и скорость реакции равна

$$r_3 = -k'_3 \cdot C_3^m \quad (10.8-4)$$

где  $k'_3$  - кинетическая скорость реакции, а  $m$  – порядок реакции. Концентрация  $\text{SiO}_2$  должна появиться в уравнении (10.8-4), но он присутствует в таком избытке, что его концентрация остается постоянной. (Толкование случая, когда концентрация кремнезема изменяется по мере протекания реакции, см. Хеким и др., 1982; Ёртсос, 1982.) Этот избыток, плюс отсутствие гидроокисной связи с поверхностью, объясняют отсутствие уравнения сохранения для твердой фазы. Взаимодействия жидкости с твердой фазой того типа, который представлен уравнением (10.8-4), обычно имеют порядок реакции, отличающийся от идеального случая, когда  $m = 2$ .

Реакции жидкости с твердой фазой могут ограничиваться переносом массы из объемной фазы на поверхность. Пусть  $h_3$  будет коэффициентом переноса массы, выражающим эту скорость переноса. Таким образом, поток ионов гидроокиси на поверхность равен

$$N_3 = h \cdot (C_3 - \tilde{C}_3) \quad (10.8-5)$$

где  $\tilde{C}_3$  обозначает оцененную концентрацию на поверхности (не концентрацию твердой фазы). Концентрация на поверхности – это то, что определяет  $r_3$ . Если мы предположим, что локальный перенос массы равен скорости реакции на поверхности, то

$$h \cdot (C_3 - \tilde{C}_3) = k'_3 \cdot \tilde{C}_3^m \quad (10.8-6)$$

В принципе это уравнение может быть решено для  $\tilde{C}_3$ , и затем, подставляя результат в уравнение (10.8-4), можно получить выражение скорости полностью в единицах объемной концентрации  $C_3$ . Но на практике этот процесс удобен только для случая, когда  $m = 1$ . Из этого логически вытекает

$$r_3 = -k_3 \cdot C_3 \quad (10.8-7a)$$

где

$$k_3 = \left( \frac{1}{h_3} + \frac{1}{k'_3} \right)^{-1} \quad (10.8-7b)$$

- это общая кинетическая постоянная. Последнее выражение показывает, что  $k_3$  – это среднее гармоническое сопротивлений переносу массы. Если любое сопротивление становится незначительным,  $k_3$  становится равным сопротивлению оставшегося процесса.

Вставляя уравнение (10.8-7а) в уравнение (10.8-2) и возвращаясь к безразмерным переменным, получаем

$$\frac{\partial C_3}{\partial t_D} + \frac{\partial C_3}{\partial x_D} = -N_D \cdot C_3 \quad (10.8-8)$$

где

$$N_{Da} = \frac{k_3 \cdot L \cdot \phi}{u} \quad (10.8-9)$$

это число Дамкелера, относительные скорости массообмена (на твердую поверхность) и объемный поток (через среду).  $N_{Da}$  – основная масштабная переменная для неравновесных потоков. Если  $N_{Da}$  больше 10, поток по существу находится в локальном равновесии (Дженнингс и Кёркнер, 1984); если  $N_{Da}$  очень мала, реакцию можно не учитывать. При прочих равных условиях,  $N_{Da}$  обычно гораздо больше в условиях промысла, чем в лабораторных условиях из-за гораздо большей длины.

В пределах кинетически доминируемого расхода  $N_{Da}$  становится постоянной величиной при одномерном потоке. На другом краю реакций, ограниченных массообменом,  $N_{Da}$  основана на коэффициенте массопередачи. Большое количество данных указывает на то, что коэффициенты массопередачи пропорциональны скорости при потоках, происходящих при низком числе Рейнольдса (Федкив, 1979). В этом случае  $N_{Da}$  (фактически постановка задачи в условиях полной безразмерности) становится независимой от скорости.

Уравнение (10.8-8) – это неприводимое, гиперболическое, дифференциальное уравнение, которое мы уже рассматривали в Разделе 5-6. Сравнивая уравнение (5.6-3) с уравнением (10.8-8), находим:

$$\frac{dt_D}{ds} = 1, \quad \frac{dx_D}{ds} = 1, \quad \frac{dC_3}{ds} = -N_{Da} \cdot C_3 \quad (10.8-10)$$

где  $s$  – это параметр по характеристической кривой. Это уравнение подразумевает, что характеристики представляют собой прямые линии с единичным углом наклона в пространстве  $x_D - t_D$ , вдоль которого  $C_3$  изменяется как

$$C_3 = C_{3J} \cdot e^{-N_{Da} \cdot s} \quad (10.8-11)$$

Т.к. характеристики не пересекаются, гидроокись не может распространяться быстрее трассера. Выраженное в исходных переменных, решение принимает следующий вид:

$$C_3 = \begin{cases} C_{3I}, & x_D \geq t_D \\ C_{3J} \cdot e^{-N_{Da} \cdot x_D}, & x_D \leq t_D \end{cases} \quad (10.8-12a)$$

записанное в виде профиля проницаемостей, и:

$$C_3 = \begin{cases} C_{3I}, & t_D \leq 1 \\ C_{3J} \cdot e^{-N_{Da}}, & t_D \geq 1 \end{cases} \quad (10.8-12b)$$

записанное в виде изменения выходящего потока. Вы можете показать, что уравнение (10.8-12a) удовлетворяет условиям уравнения (10.8-5) и уравнения (10.8-2b).

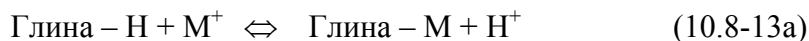
Таким же простым, как это толкование, является иллюстрация двух довольно общих особенностей переноса неравновесных реакционных систем. Во-первых, даже если импульсы образуются, реакция не задерживает распространение фронта гидроокиси. Это противоречит равновесным процессам, которые вызывают задержку фронта. Во-вторых, основное проявление реакции заключается в снижении концентрации позади волны. Для простого случая, рассматриваемого здесь, снижение концентрации является прямым следствием величины  $N_{Da}$ .

В случае более крупного источника концентрация медленно приближается к закачиваемой величине. Но при больших значениях  $N_{Da}$  это может происходить очень медленно. Банг и Радке (1982) предупреждают, что величина расхода гидроокиси, замеренная в лабораторных условиях, может ввести в заблуждение, если только значения  $N_{Da}$  на промысле и в лаборатории не будут одинаковыми. И, наконец, уменьшение концентрации позади фронта отмечается даже у потоков, находящихся в локальном равновесии, если реакции гидроокиси обратимые.

### **Катионообмен**

Еще одним процессом, протекающим при высоком рН и непосредственно связанным с глинами, является катионообмен. Как мы уже упоминали в Разделе 3-5, катионообмен хорошо аппроксимируется в виде равновесного процесса – т.е.  $N_{Da}$  для катионообмена велико. При заводнении в условиях высокого рН это явление несколько иное, т.к. один из катионов, участвующих в катионообмене, также подвергается реакции с растворителем. Нижеприведенная трактовка была первоначально представлена Бангом и Радке (1985).

Катионы  $H^+$  могут обмениваться с другими катионами, связанными с анионными местами на глине в соответствии с



при обмене одновалентного иона с водородом. Соответствующее выражение для обмена двухвалентного иона с водородом следует тому же порядку.

Изотерма, выражающая обмен в уравнении (10.8-13a), следующая:

$$K_N = \frac{C_{Ms} \cdot C_3}{C_M \cdot C_{3s}} \quad (10.8-13b)$$

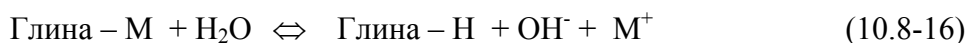
где мы приняли активность раствора и твердой фазы равными 1. Мы можем записать уравнение для непосредственного поглощения ионов гидроокиси из раствора путем исключения концентрации водорода из уравнений (10.5-2) – (10.8-13b)

$$C_3 = \frac{K_N \cdot C_{Ms}}{K_1 \cdot C_M \cdot C_{3s}} \quad (10.8-14)$$

где  $C = [H^+]$  – в совместимых единицах. Аналогичным образом, концентрацию связанного водорода  $C_{3s}$  можно исключить, определив ограничивающее условие для электронейтральности твердой фазы,  $Z_0 = C_{3s} + C_{Ms}$  чтобы получить решение для связанных одновалентных ионов:

$$C_{Ms} = \frac{\left( Z_v \cdot \frac{K_N}{K_1} \cdot C_3 \right) \cdot C_M}{1 + \left( \frac{K_N}{K_1} \cdot C_3 \right) \cdot C_M} \quad (10.8-15)$$

Равновесие, выраженное уравнением (10.8-15), отражает нижеследующую реакцию обмена:



из которой мы видим, что сорбция эквивалента одновалентного катиона соответствует исчезновению эквивалента гидроокиси из раствора. Поэтому мы можем отождествить левую часть уравнения (10.8-15) с частичным поглощением гидроокиси.

Уравнение (10.8-15) имеет форму изотермы Лэнгмюра, которую мы рассматривали в Разделе 8-2. Это тоже указывает на то, что обмен обратимый, и удерживание в области пологого участка кривой не зависит от концентрации одновалентных ионов. Скорость приближения к этому пологому участку кривой сильно зависит от концентрации одновалентных ионов, и фактически кривизна изотермы может в значительной степени подавляться в случае высокой минерализации. На Рис.10-13 представлены экспериментально замеренные изотермы поглощения гидроокиси. Все кривые, за исключением одной (указанной) получены в отсутствии натрия.

В отличие от неравновесных реакций, рассмотренных выше, равновесные процессы вызывают замедление. Рис.10-14 демонстрирует совместное действие катионообмена и равновесной реакции на результаты лабораторного заводнения. Отметьте запаздывание фронта и некоторое снижение pH после прибытия фронта. Для заводнения при пониженном pH требуется закачка жидкости в размере более 3 поровых объемов, чтобы достичь закачиваемого уровня pH.

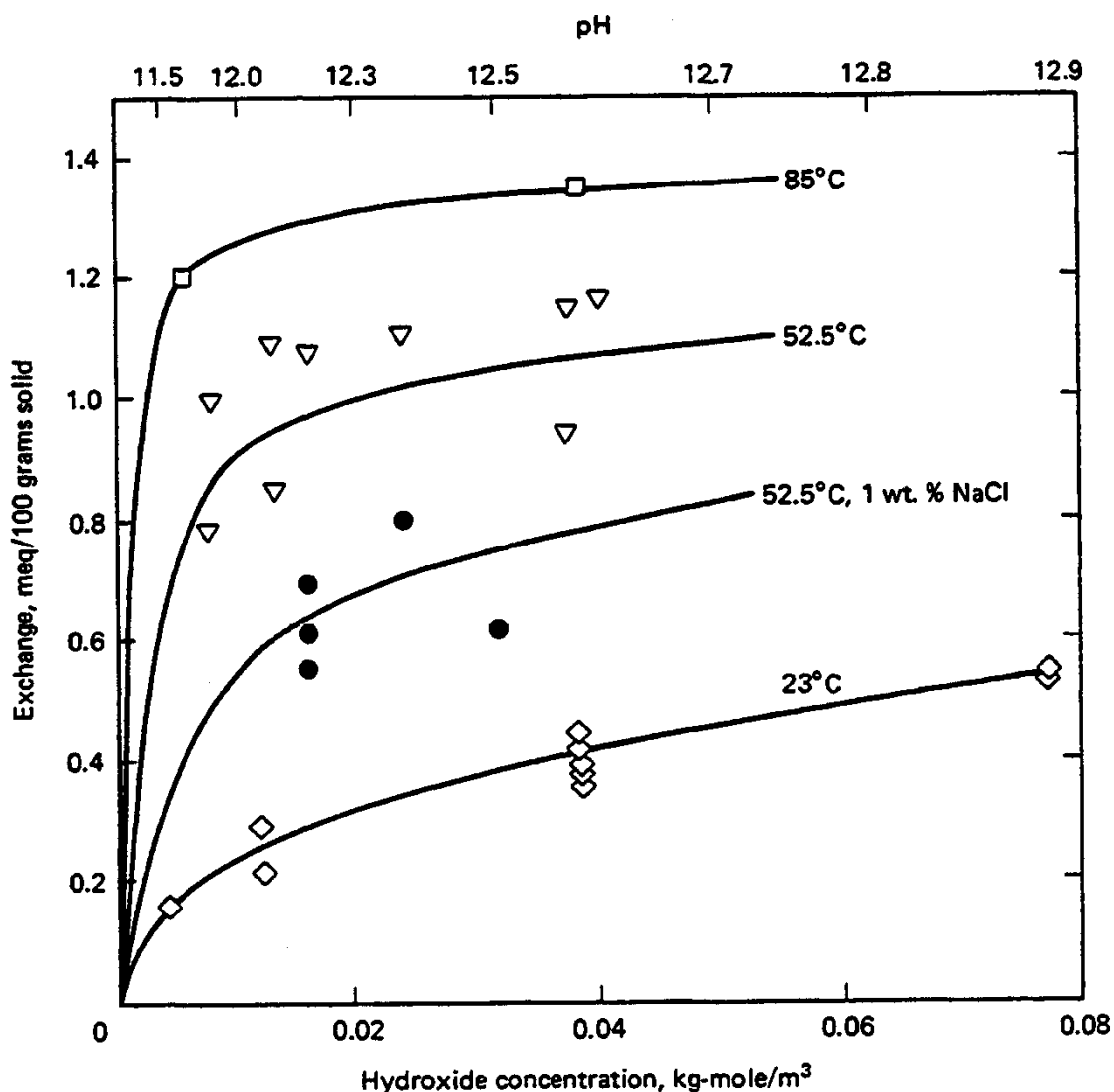


Рис.10-13 Обратимое поглощение гидроокиси, м.р. Уилмингтон, участок Рэйнджер, песчаный пласт (Банг и Радке, 1985)

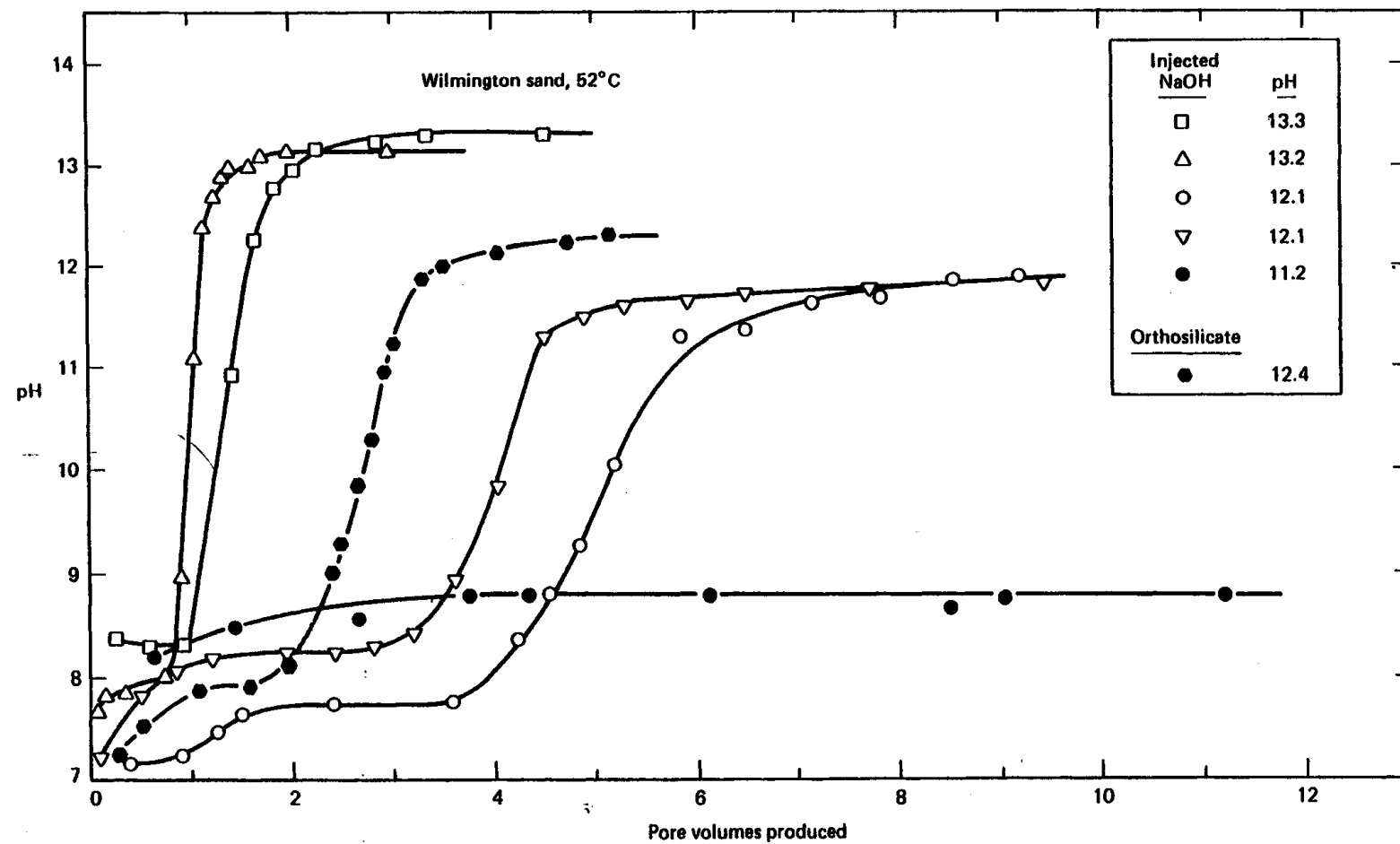
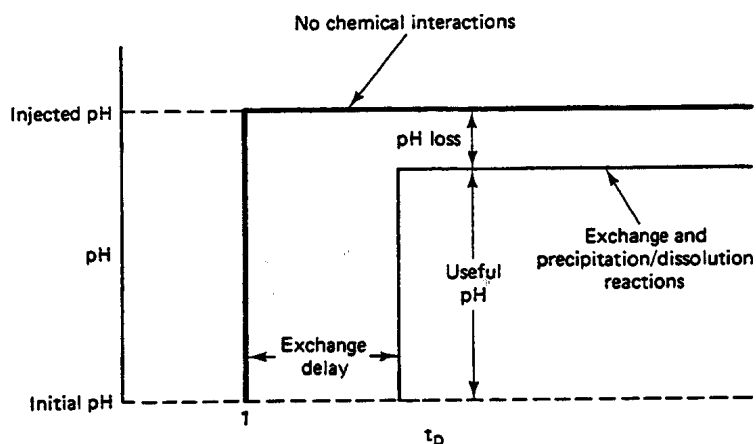


Рис.10-14 Изменение рН выходящего потока, полученное экспериментальным и теоретическим путем (Банг и Радке, 1982)

### Упрощенный метод

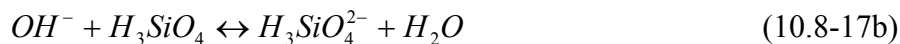
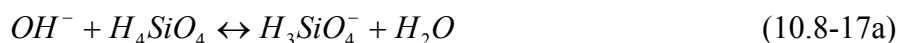
Запаздывание гидроокиси, проиллюстрированное на Рис.10-14, можно легко оценить, используя упрощенный метод Брайанта и др. (1986).

Сначала приведем некоторые определения (Рис.10-15) для идеального потока. *Отставание рН* – это разница между временем прибытия идеального трассера и временем прибытия волны гидроокиси на выходной конец проницаемой среды. *Полезный рН* – это рН позади волны рН, а *потеря рН* – это разность между закачанным рН и полезным рН. Как мы уже предположили ранее, отставание рН обусловлено, главным образом, катионообменом, а потеря рН – растворением силикатных материалов.



**Рис.10-15** Определения для идеального переноса гидроокиси (Брайант и др., 1986)

Упрощенный метод строится на локальном равновесии. Это означает, что прогнозы будут осторожными, т.е. прогноз даст несколько большие запаздывание и потерю, чем отмечается в действительности. Для оценки это желательно. Байант и др. предполагают, что выпадение гидроокиси в осадок незначительно, а растворение кремнезема (уравнение 10.8-3) и образование растворимых  $H_2SiO_4^-$  и  $Si_2O_4^{2-}$  объясняет расход большей части закачанного  $OH^-$  позади волны рН. Эти виды образуются за счет двух ниже приведенных реакций:



Уравнения (10.8-17a) и (10.8-17b) являются просто детализацией уравнения (10.8-3). Равновесия для реакций уравнений (10.8-3), (10.8-17a) и (10.8-17b) следующие:

$$K^{sp} = [C_{H_4SiO_4}] \quad (10.8-18a)$$

$$K_1 = \frac{[C_{H_3SiO_4^-}]}{[C_3][C_{H_3SiO_4}]} \quad (10.8-18b)$$

$$K_2 = \frac{[C_{H_2SiO_4^{2-}}]}{[C_3][C_{H_3SiO_4^-}]} \quad (10.8-18c)$$

где концентрации выражены в эквивалентах на объем порового объема, поведение предполагается идеальным, активность твердого SiO<sub>2</sub> равна единице, а концентрация воды – константа, включенная в константу равновесия. В Таблице 3-7 приведены многочисленные значения K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> и K<sup>sp</sup>. Эти константы можно скорректировать до нужной температуры, используя уравнение (3.5-13).

Полезный pH следует из расчета, в котором задействованы выше упомянутые виды. Обозначим сумму концентраций OH<sup>-</sup>, H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup> и H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в закачиваемой водной жидкости как C<sub>л</sub>

$$C_{л} = [C_3] + [C_{H_3SiO_4^-}] + [C_{H_2SiO_4^{2-}}] \quad (10.8-19)$$

Исходя из этого, переменная C<sub>л</sub> аналогична суммарным молярным концентрациям, которые мы рассматривали в Разделе 4-4, а уравнение (10.8-19) равноценно уравнению (4.4-3). Конечно, в области пологого участка кривой существуют несколько других анионных видов; они либо присутствуют в незначительном количестве, либо не участвуют в реакции. В последнем случае их нужно вычесть из уравнения баланса массы, т.к. их уравновешенные и преуравновешенные концентрации будут одинаковы. Аналогичный аргумент нужно применить и к катионам, т.к. глины в области пологого участка кривой были уравновешены за счет закачанного раствора волной pH.

Выражения равновесия (уравнение 10.8-18) могут исключить из уравнения (10.8-9) все концентрации, за исключением концентрации гидроокиси. Находя решение для C<sub>3</sub>, получаем

$$[C_3] = \frac{-(1 + K^{sp} \cdot K_1) + \left[ (1 + K^{sp} \cdot K_1)^2 + 8 \cdot K^{sp} \cdot K_2 \cdot C_{л} \right]^{1/2}}{4 \cdot K^{sp} \cdot K_2} \quad (10.8-20)$$

Полезный pH находим из уравнений (10.5-1) и (10.5-2) после решения уравнения (10.8-20). До этого преобразования концентрации в уравнении (10.8-20) нужно перевести в молярные единицы. Уравнение (10.8-2), кроме того, показывает преимущество закачки забуференных силикатных растворов, т.к. C<sub>л</sub>, и следовательно, полезный pH будут выше, чем при отсутствии силиката. С физической точки зрения это означает, что концентрации ионов закачанного силиката находятся почти в равновесии со средой, и потеря pH минимальная. Лабораторное заводнение с применением ортосиликата натрия (Рис.10-14) подтверждает этот эффект.

Запаздывание pH обусловлено загрузкой глин гидроокисью. Удельная скорость отставания pH следует из хроматографии видов, подвергающихся переносу с сорбцией по закону Лэнгмюра (уравнение (8.2-10)

$$v_{\Delta C_3} = \left( 1 + \frac{C_{3s} - C_{3sl}}{C_3 - C_{3l}} \right)^{-1} \quad (10.8-21)$$

где C<sub>3</sub> следует из уравнения (10.8-20), а C<sub>3s</sub> (теперь концентрация сорбированной гидроокиси) – из величины изотермы (Рис.10-13), соответствующей C<sub>3</sub>. В отличие от потери pH, на отставание pH сильно влияют другие присутствующие катионы, потому что они влияют на изотерму гидроокиси. Прорыв волны pH происходит при обратном числе удельной скорости, и отставание – это разность 1 и этого числа.

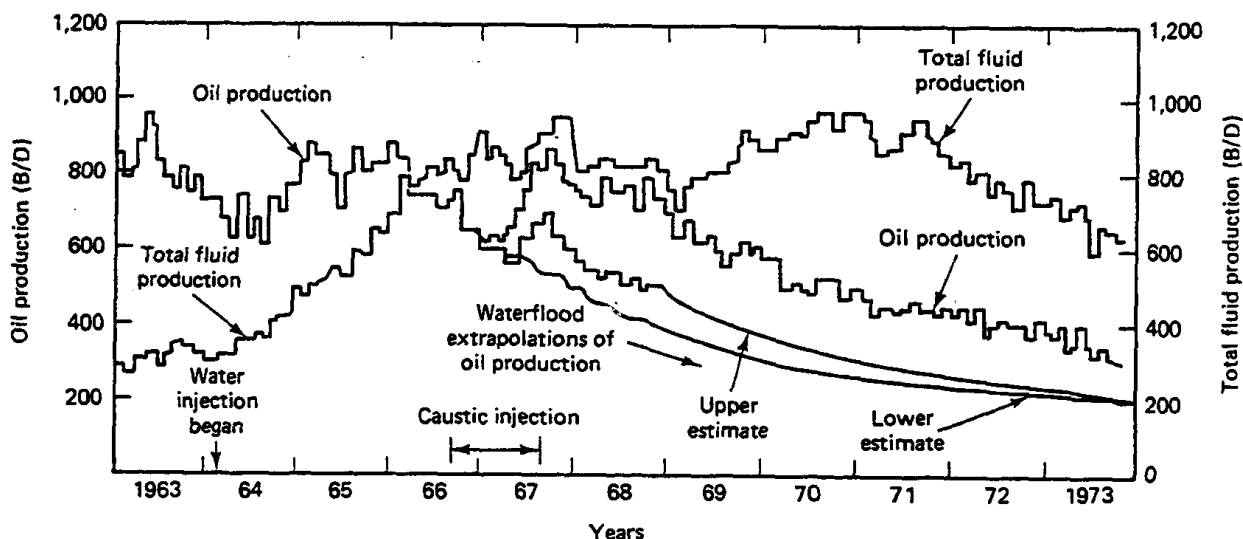
Брайант и др. (1986) сравнивают разницу между расчетной и экспериментальной потерей и отставанием pH на примере шести различных лабораторных заводнений. Как и предполагалось, расчеты дают несколько большую величину отставаний pH и несколько



завышенные значения полезных рН. Тем не менее, соответствие можно считать удовлетворительным для многих технологических целей, особенно, учитывая простоту метода.

### 10-9 Промысловые результаты

На Рис.10-16 представлены данные по добыче, полученной в результате проведения заводнения в условиях высокого рН на месторождении Уиттер. Плотность сырой нефти составляла  $20^0$  АНИ, вязкость – 40 мПа; закачивали 0.2% (вес.) NaOH в виде оторочки размером 0.23 порового объема.



**Рис.10-16** Добыча, полученная в результате щелочного заводнения на месторождении Уиттер (Грау и Джонсон, 1974)

Многие особенности данного процесса являются такими же, как и в других процессах химического заводнения. Темп добычи нефти снижается с увеличением добычи общего количества жидкостей, указывая на уменьшении доли нефти в добываемом продукте. Дебит нефти, полученный в результате закачки щелочи, вновь налагается на экстраполированное падение добычи при обычном заводнении, что позволяет определить дополнительную нефтеотдачу. (На Рис.10-16 показаны две кривые падения добычи при обычном заводнении; одна отражает фактическое падение добычи, другая – результат компьютерного моделирования.) 55750 – 74860 стандартных куб. м нефти, добытой за счет закачки щелочи считаются успешной обработкой.

В Таблице 10-1 собраны данные завершенных промысловых заводнений, проводившихся в условиях высокого рН. Отметьте большой разброс в характеристиках пласта и нефти, равно как и в нефтенасыщенности, на начало заводнения. Дополнительная нефтеотдача, выраженная в % порового объема, колеблется от 0.0006 до 8.0, что дает нефтеотдачу (выраженную в виде % от начального количества нефти в пласте на начало заводнения) соизмеримую, лишь незначительно меньшую, чем нефтеотдача, получаемая в полимерных заводнениях. В равной степени важно количество баррелей дополнительно добытой нефти на фунт закачанного реагента (0.015 – 0.43, Таблица 10-1). Эта величина значительно ниже, чем в полимерном заводнении, однако и стоимость реагента, дающего высокий рН, также существенно меньше.

**Таблица 10-1** Сводка промысловых испытаний закачки реагентов, создающих условия высокого pH (Мэйер и др., 1980)

Местоположение промысла	Тип агента с высоким pH	Кислотное число (мг КОН/г)	Концентрация закачиваемого реагента (% вес.)	Размер оторочки (% порового объема)	Дополнительная нефтеотдача (% порового объема)	Потребность в химреагенте (нормальных баррелей нефти / фунт реагента)
Южно-восточный Техас	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2.4	3.2			
Харрисбург, Небраска	NaOH	низкое	2.0	0.013	0.003	0.03
Нотворд-Эстес, Техас	NaOH	0.22	5.0	15	8.0	0.03
Синглетон, Небраска	NaOH	низкое	2.0	8	0.023	0.042
Уиттер, Калифорния	NaOH		0.2	20	0.05-0.07	0.32-0.43
Бри-Олинда, Калифорния	Ортосиликат	0.12				
Оркат Хилл, Калифорния	Ортосиликат	0.6	0.42	0.017	0.0006	0.015-0.030