

8

Методы полимерного заводнения

Полимерное заводнение заключается в добавлении полимера в воду для уменьшения ее подвижности. Получаемое увеличение вязкости, а также уменьшение проницаемости по водной фазе, которое происходит при использовании некоторых полимеров, является причиной более низкого отношения подвижностей. Это уменьшение отношения подвижностей повышает эффективность заводнения за счет более высокого коэффициента охвата по объему и меньшей нефтенасыщенности в отмытой зоне. Минимальная остаточная нефтенасыщенность не уменьшается, хотя остающаяся после процесса вытеснения нефтенасыщенность уменьшается, приближаясь к S_{2r} , как в обычном, так и в полимерном заводнении. Более высокий коэффициент нефтеотдачи является экономическим стимулом для осуществления полимерного заводнения. Как правило, полимерное заводнение бывает экономически выгодным только в тех случаях, когда отношение подвижностей при обычном заводнении высоко, неоднородность пласта большая или отмечается сочетание этих двух факторов.

Существует три способа применения полимеров в процессах добычи нефти:

1. При обработке призабойных зон для улучшения рабочих характеристик нагнетательных скважин или обводненных добывающих скважин за счет блокирования зон высокой проницаемости.
2. В качестве агентов, которые могут сшиваться в пласте, закупоривая зоны высокой проницаемости на глубине (Нидгам и др., 1974). Для осуществления этих процессов нужно, чтобы полимер закачивался с неорганическим катионом металла, который образует впоследствии поперечные связи между молекулами закачанного полимера и молекулами, уже связанными на поверхности породы.
3. В качестве агентов, снижающих подвижность воды или уменьшающих отношение подвижностей воды и нефти.

Первый способ не является истинным полимерным заводнением, т.к. в качестве агента, вытесняющего нефть, используется не полимер. Несомненно, большинство проектов повышения нефтеотдачи за счет применения полимеров, попадают под пункт 3, на котором мы остановимся. В Главах 5 и 6 мы уже обсуждали каким образом уменьшение отношения подвижностей влияет на коэффициент вытеснения и коэффициент охвата по объему.

Заводнение с применением химических реагентов (Полимер)

Для осуществления метода, изображенного на рисунке, требуется предварительная промывка, создающая нужные условия в пласте, закачка полимерного раствора, регулирующего подвижность, для того, чтобы свести к минимуму проскальзывание воды, и вытесняющая жидкость (вода) для вытеснения раствора полимера и образующегося нефтяного вала в направлении добывающих скважин.

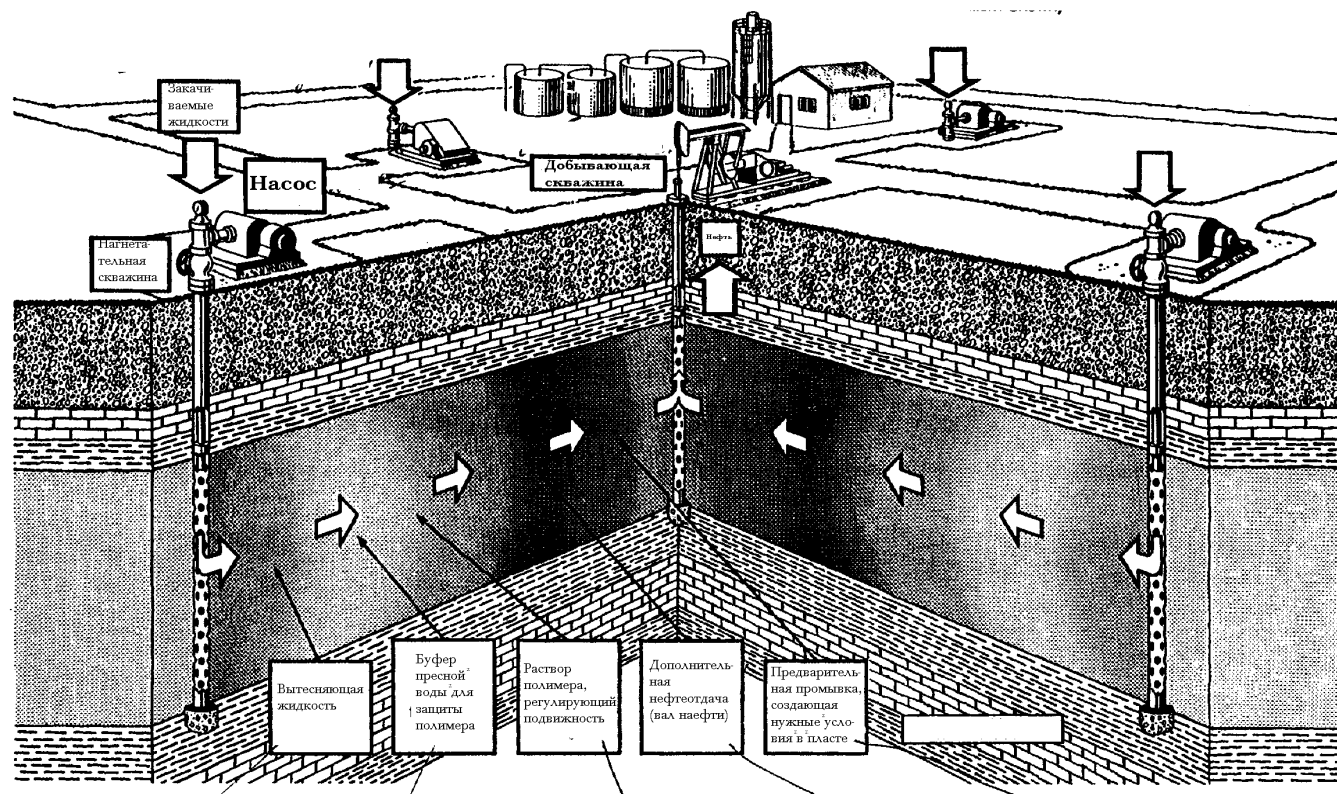


Рис.8-1 Схематическое изображение последовательности полимерного заводнения (рис. Джо Линдлея, Департамент энергетики, США, Бартлесвилл, Оклахома)

На Рис.8-1 дано схематическое изображение последовательности закачки в типичном полимерном заводнении: предварительная промывка, как правило, из слабо минерализованной воды; нефтяной вал; сам полимерный раствор; буфер пресной воды для защиты полимерного раствора от разбавления на заднем крае; и, наконец, продавочная или вытесняющая вода. Часто буфер содержит полимер, количество которого постепенно убывает, чтобы уменьшить неблагоприятное отношение подвижностей между продавочной водой и полимерным раствором. Из-за того, что процесс носит вытесняющий характер, полимерные заводнения всегда осуществляются на отдельных группах нагнетательных и добывающих скважин.

Подвижность в полимерном заводнении снижается путем закачки воды, которая содержит высокомолекулярный водорастворимый полимер. Т.к. в качестве воды обычно используют разбавленные пластовые воды, степень минерализации имеет большое значение, особенно для определенного класса полимеров.

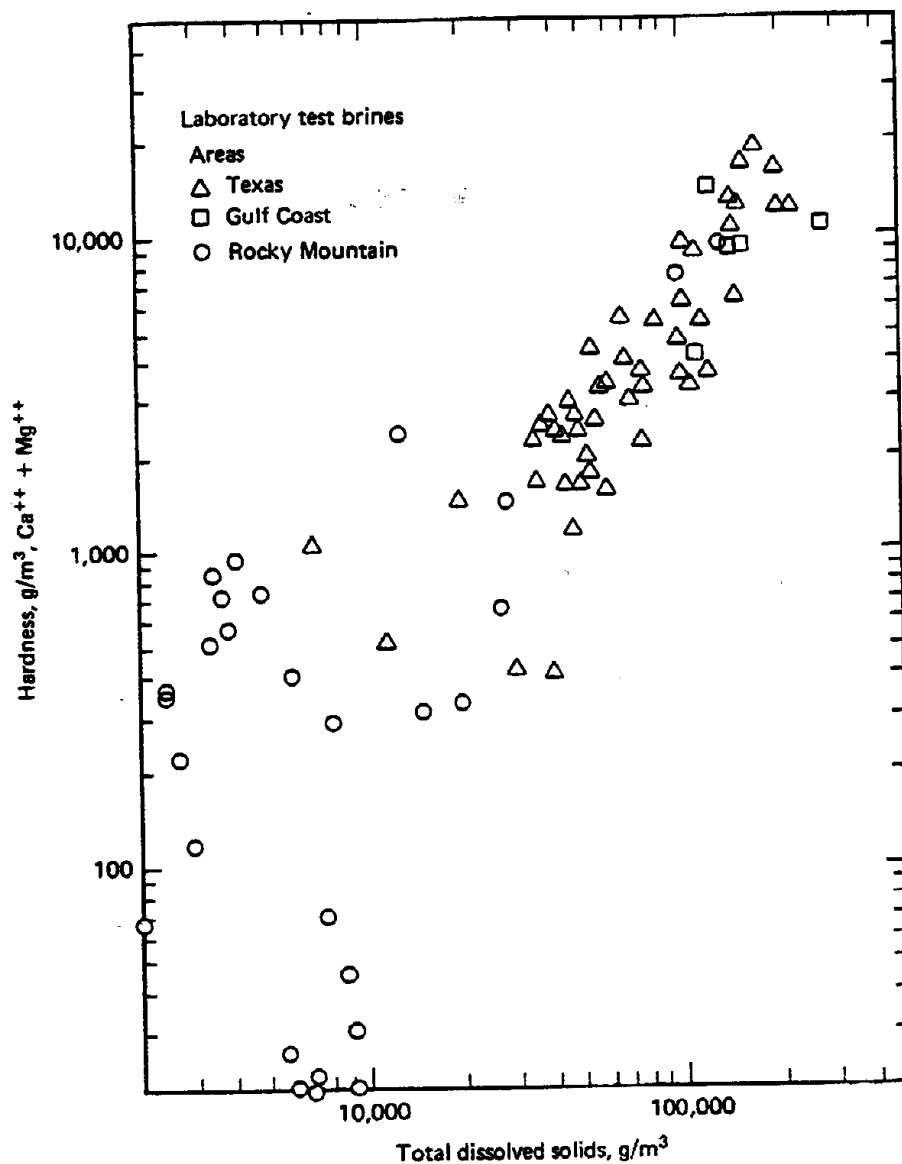


Рис.8-2 Минерализация типичных пластовых вод (Гаш и др., 1981)

Минерализация – это общее количество растворенных твердых веществ, содержащееся в водной фазе. Типичная минерализация некоторых пластовых вод представлена на Рис.8-2. В сущности, все свойства химического заводнения зависят от концентраций определенных ионов, а не только от минерализации. Общее содержание двухвалентных катионов в водной фазе (жесткость) является, как правило, более критическим фактором для свойств химического заводнения, чем та же концентрация растворенных твердых веществ. На Рис.8-2 приведена также и жесткость типичных пластовых вод.

Из-за высокого молекулярного веса (1-3 млн.) очень небольшое количество полимера (примерно 500 г/м^3) дает существенное увеличение вязкости воды. Кроме того, несколько видов полимеров снижают подвижность за счет уменьшения относительной проницаемости по воде, помимо увеличения вязкости воды. Каким образом полимеры уменьшают подвижность и как взаимодействуют с минерализацией можно проиллюстрировать, рассмотрев химический состав полимеров.

8-1 Полимеры

В качестве агентов полимерного заводнения рассмотрели несколько полимеров: это – ксантановая смола, гидролизованный полиакриламид (ГПАА), сополимеры (полимер, состоящий из двух и более типов мономеров) акриловой кислоты и акриламида, сополимеры акриламида и 2-акриламид 2-метилпропансульфоната (АА/АМПС), гидроксипропилцеллюлоза, карбоксиметилгидроксипропилцеллюлоза, полиакриламид (ПАА), полиакриловая кислота, глюкан, декстрана, полиоксиэтилен и поливинилловый спирт. Хотя только первые три фактически используются на промысле, существует много потенциально пригодных реагентов, и некоторые из них могут оказаться более эффективными, чем те, которые используются в настоящее время.

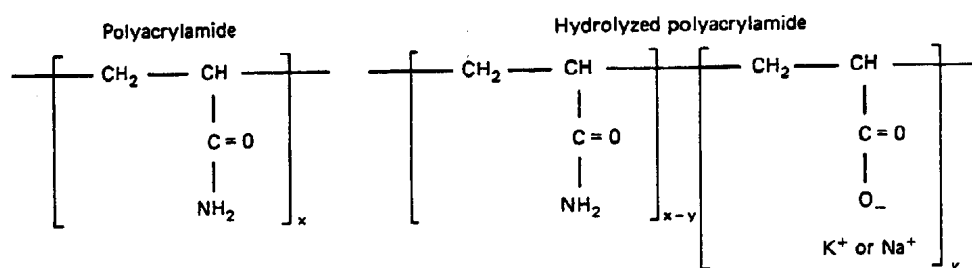
Тем не менее, все промышленные полимеры попадают фактически в два класса: класс полиакриламидов и класс полисахаридов (биополимеры). Далее в обсуждении мы будем обращаться именно к ним. На Рис.8-3 представлена типичная молекулярная структура полимеров.

Полиакриламиды

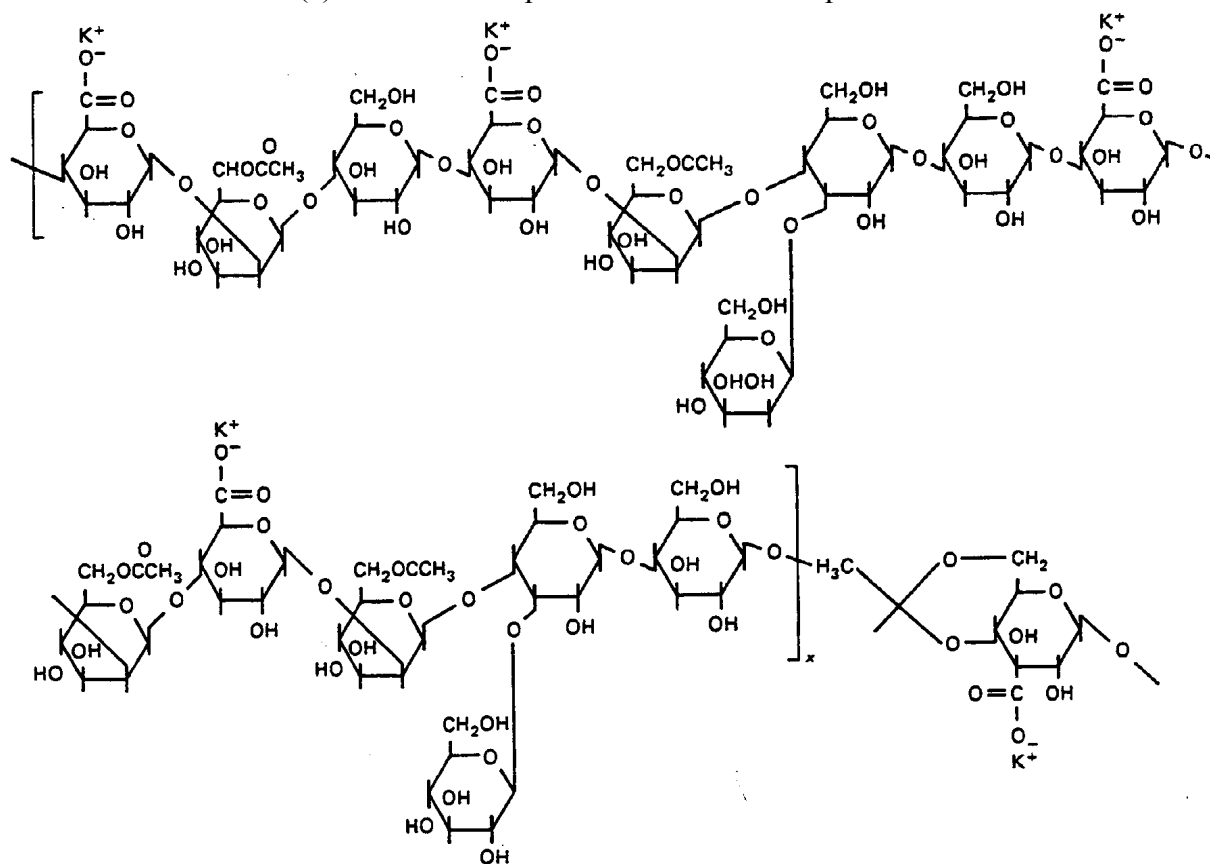
Это полимеры, мономерное звено макромолекулы которых представлено молекулой акриламида. Полиакриламиды, используемые в полимерном заводнении, подвергаются частичному гидролизу, в результате чего анионные (отрицательно заряженные) карбоксильные группы ($-COO^-$) оказываются разбросанными вдоль основной цепи макромолекулы. По этой причине полимеры называются частично гидролизованными полиакриламидами. Обычно степень гидролиза составляет 30-35% акриламидных мономеров; поэтому молекула частично гидролизованного полиакриламида отрицательно заряжена, что объясняет многие ее физические свойства.

Эта степень гидролиза была выбрана с таким расчетом, чтобы оптимизировать определенные свойства, как например, растворимость в воде, вязкость и удерживающую способность. Если степень гидролиза слишком мала, полимер не будет растворяться в воде. Если велика, его свойства будут слишком чувствительны к действию минерализации и жесткости (Шуп, 1981).

Характерная особенность гидролизованного полиакриламида увеличивать вязкость заключается в его большом молекулярном весе.



(a) Частично гидролизованный полиакриламид



(b) Полисахарид (биополимер)

Рис.8-3 Молекулярные структуры (Уилхайд и Доминквец, 1977)

Эта особенность усиливается анионным отталкиванием между молекулами полимера и между сегментами одной и той же молекулы. Отталкивание является причиной того, что молекула в растворе растягивается и сцепляется с другими молекулами, растянутыми аналогичным образом, что вызывает уменьшение подвижности при повышенных концентрациях.

Если минерализация или жесткость раствора высока, это отталкивание значительно уменьшается за счет ионного экранирования, т.к. свободно вращающиеся углерод-углеродные связи (Рис.8-3а) позволяют молекуле свернуться в клубок. Экранирование вызывает соответственно уменьшение эффективности полимера, т.к.

сцепление заметно снижено. Фактически все свойства частично гидролизованного полиакриламида проявляют высокую чувствительность к минерализации и жесткости воды, что является препятствием для применения частично гидролизованных полиакриламидов во многих пластах. С другой стороны, частично гидролизованный полиакриламид – это недорогой реагент, относительно стойкий к действию бактерий, и дает постоянное уменьшение проницаемости.

Полисахариды

Эти полимеры образуются в результате полимеризации молекул сахаридов (Рис.8-3b) в процессе бактериального брожения. Этот процесс оставляет значительное количество обломков, которые необходимо убрать до закачки полимера (Веллингтон, 1980). Кроме того, полимер чувствителен к бактериальному воздействию после его закачки в пласт. Эти недостатки компенсируются невосприимчивостью свойств полисахарида к минерализации и жесткости воды.

На Рис.8-3(b) показана причина этой невосприимчивости. Молекула полисахарида является сравнительно неионогенной и поэтому свободной от эффектов ионного экранирования, присущих частично гидролизованному полиакриламиду. Полисахариды имеют более разветвленную структуру, чем частично гидролизованные полиакриламиды, и углеродная связь с атомом кислорода в кольце вращается не полностью; поэтому молекула повышает вязкость раствора за счет сцепления и добавления в раствор более жесткой структуры. Полисахариды не дают уменьшения проницаемости. Молекулярный вес полисахаридов колеблется в районе 2 миллионов.

На сегодняшний день частично гидролизованные полиакриламиды дешевле полисахаридов из расчета за единицу массы реагента, но если сравнивать уменьшение подвижности, исходя все из той же единицы массы, особенно при высоких минерализациях, цены разнятся ненамного, так что решать, какой полимер предпочтительнее нужно, исходя из конкретных условий применения. В прошлом частично гидролизованные полиакриламиды применялись почти в 95% промышленных полимерных заводнений (Маннинг и др., 1983). Оба класса полимеров претерпевают химическую деструкцию при повышенных температурах.

Состояния полимеров

Вышеупомянутые полимеры существуют в трех разных физических состояниях: в виде порошкообразного вещества, бульонной культуры и эмульсий. Порошкообразные полимеры, появившиеся раньше других, можно легко транспортировать и хранить при небольших затратах. Их трудно смешивать, т.к. при первом же контакте с водой полимер имеет тенденцию образовывать очень вязкие гидрационные слои вокруг частиц, что существенно замедляет последующее растворение. Бульонные культуры – это водная суспензия полимера (примерно 10% по весу), из которой гораздо легче приготовить раствор, чем из порошкообразного полимера. Их недостаток заключается в том, что они достаточно дорогие, из-за необходимости транспортировать и хранить большие объемы воды. Бульонные культуры довольно вязкие, так что для их перемешивания может потребоваться специальное оборудование. Фактически это именно та трудность, которая ограничивает концентрацию полимера в бульонной культуре. Полимерные эмульсии, которые являются новейшей формой полимера, содержат до 35% (вес.) полимерного раствора во взвешенном состоянии (за счет применения ПАВ) в несущей масляной фазе. После того как водомасляная эмульсия инвертируется (см. Рис.9-5), полимерный концентрат может смешиваться с добавочной водой до нужной концентрации для

закачки. Эмульсия течет примерно с той же скоростью, что и масляная фаза, которая может использоваться повторно.

8-2 Свойства полимеров

В этом разделе мы представим качественные тенденции, количественные зависимости и представительные данные по таким характеристикам, как: зависимость вязкости, неньютоновские эффекты, перенос полимера, недоступный поровый объем, уменьшение проницаемости, химическая и биологическая деструкция, и механическая деструкция.

Зависимость вязкости

На Рис.8-4 показан график зависимости вязкости от концентрации полимера Ксанфлад. Такой тип кривой традиционно строится по уравнению Флори – Хаггинса (Флори, 1953)

$$\mu' = \mu_1 \cdot [1 + a_1 \cdot C_{41} + a_2 \cdot C_{41}^2 + a_3 \cdot C_{41}^3 + \dots] \quad (8.2-1)$$

где C_{41} – концентрация полимера в водной фазе, μ_1 – вязкость раствора (растворителя), а a_1, a_2 и т.д. являются константами. В оставшейся части этой главы мы опустим построчный индекс 1 у концентрации полимера, поскольку полимер всегда находится в водной фазе. Обычная единица концентрации полимера берется в $г / м^3$ раствора, что приблизительно равно ppm (часть на млн.). Линейный член уравнения (8.2-1), отвечает за диапазон разбавления, в котором молекулы полимера действуют независимо (без зацепления). Для большинства целей уравнение (8.2-1) может быть сокращено по кубическому члену.

Рис.8-4 показывает, что для раствора полимера Ксанфлад концентрацией $1,000 г/м^3$ при $0.1 сек^{-1}$ в 1% (вес) растворе NaCl при температуре $24^{\circ}C$ вязкость равна $70 мПа \cdot сек$ (70 сантипуаз).

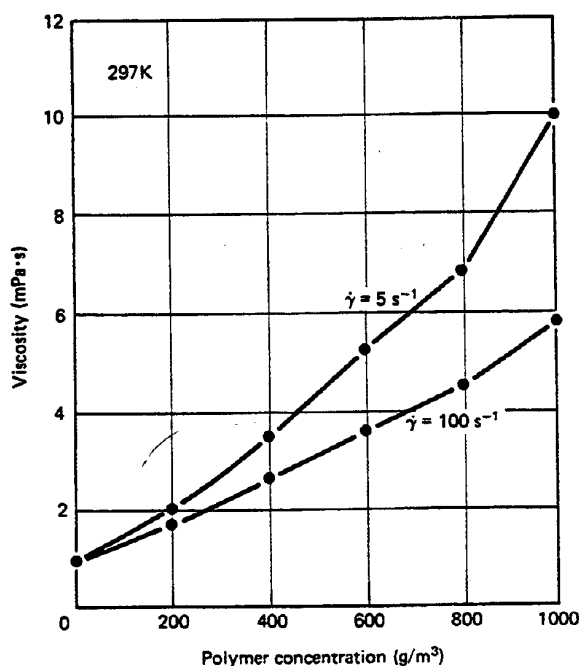


Рис.8-4 Зависимость вязкости раствора полимера Ксанфлад от концентрации в 1% NaCl (Цаур, 1978)

По сравнению с вязкостью соляного раствора в тех же условиях это существенное увеличение вязкости, полученное при относительно разбавленной концентрации (вспомните, что $1,000 \text{ г/м}^3 = 0.1 \text{ вес. \%}$). Ксанфлад в этих условиях является превосходным загустителем.

Более фундаментально загущающая способность полимера определяется через его характеристическую вязкость, определяемую как

$$[\mu] = \lim_{C_4 \rightarrow 0} \left[\frac{\mu_1' - \mu_1}{\mu_1 \cdot C_4} \right] \quad (8.2-2)$$

Из этого определения $[\mu]$ - это критерий загущающей способности полимера. Она не чувствительна к концентрации полимера. Характеристическая вязкость полимера Ксанфлад в условиях, упомянутых выше, равна 70 дл/гр; единица измерения эквивалентна величине, обратной весовому %. Характеристическая вязкость это то же самое, что и член a_1 в уравнении (8.2-1).

Для любой пары полимер – растворитель характеристическая вязкость возрастает с увеличением молекулярного веса полимера согласно нижеприведенному уравнению (Флори, 1953):

$$[\mu] = K' \cdot M_w^a \quad (8.2-3)$$

Показатель степени колеблется между 0.5 и 1.5, и его величина выше в случае хороших растворителей, как например, пресная вода. K' - константа, характерная для конкретного полимера.

Приведенные выше зависимости используются для получения характеристики полимерного раствора. Например, размер полимерных молекул в растворе можно определить по уравнению Флори (1953) для среднего расстояния между концами цепи макромолекулы

$$d_p = 8 \cdot (M_w \cdot [\mu])^{1/3} \quad (8.2-4)$$

Это уравнение, являясь эмпирическим, предполагает использование определенных единиц: $[\mu]$ должна быть в дл/г, а d_p возвращается в ангстремы (10^{-10} м). Эта единица измерения размера полимера способствует пониманию того, как эти очень крупные молекулы распространяются через мелкие поровые отверстия породы. Молекулярный вес ксантановой смолы – примерно 2 миллиона. Из уравнения (8.2-4) d_p равно приблизительно 0.4 $\mu\text{м}$. Это тот же размер, который имеют многие поровые сужения в песчанике низкой – средней проницаемости. В результате, мы можем предположить, и фактически наблюдаем многочисленные взаимодействия полимера и породы.

Неньютоновские эффекты

На Рис.8-5 показана вязкость полимерного раствора μ_1' в зависимости от скорости сдвига \hat{y} , замеренная на лабораторном вискозиметре при постоянной минерализации. При низких скоростях сдвига μ_1' не зависит от \hat{y} ($\mu_1' = \mu_1^0$), и раствор представляет собой ньютоновскую жидкость. При повышенных \hat{y} μ_1' уменьшается, приближаясь к предельному значению ($\mu_1' = \mu_1^\infty$), которое ненамного превышает вязкость воды μ_1 при некоей критической высокой скорости сдвига. Эта критическая скорость сдвига находится за пределами шкалы в ее правой части, Рис.8-5. Жидкость, вязкость которой уменьшается с увеличением \hat{y} , является жидкостью, *разжижающейся при сдвиге*.

Сдвиговое разжижение полимерного раствора обусловлено тем, что полимерные цепи, растянутые в сдвиговом потоке, не свертываются в клубок и не сцепляются.

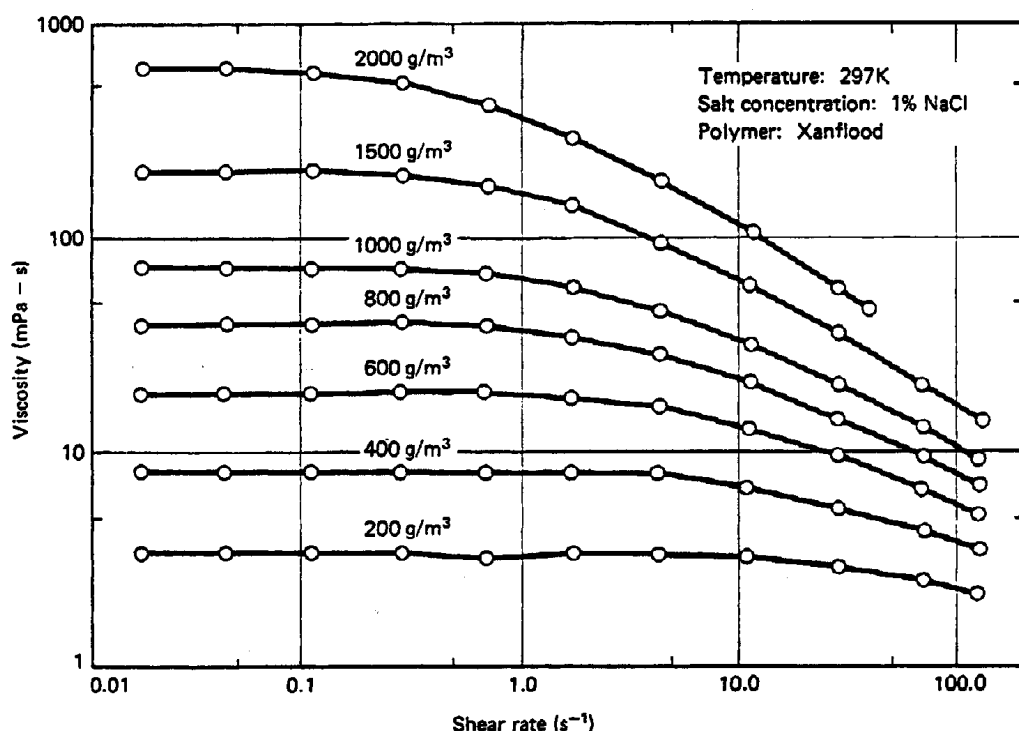


Рис.8-5 Зависимость вязкости полимерного раствора от скорости сдвига и концентрации полимера (Цаур, 1978)

При скорости сдвига ниже критической поведение частично обратимо.

На Рис. 8-6 представлен график зависимости вязкости от скорости сдвига для акриламидметилпропансульфонатного полимера при постоянной концентрации полимера и переменной концентрации NaCl. Чувствительность вязкости к минерализации сильная. Как правило, вязкость полимерного раствора уменьшается в 10 раз при каждом 10кратном увеличении концентрации NaCl. Вязкость частично гидролизованных полиакриламидов и их производных еще более чувствительна к жесткости, а вязкость растворов полисахаридов относительно нечувствительна ни к первому, ни ко второму параметру.

Поведение, показанное на Рис.8-5 и 8-6, является благоприятным, т.к. в объеме пласта $\dot{\gamma}$ обычно невелика (примерно $1 - 5 \text{ сек}^{-1}$), что позволяет достигнуть желаемого отношения подвижностей с минимальным количеством полимера. Но около нагнетательных скважин $\dot{\gamma}$ может быть достаточно большой, что является причиной повышенной фильтруемости полимера, чем предполагалось, исходя из μ_1^0 . Относительная величина этого эффекта повышенной фильтруемости может быть определена (Раздел 8-3), раз даны количественные определения скорости сдвига в проницаемой среде и зависимости вязкости от скорости сдвига.

Зависимость между вязкостью полимерного раствора и скоростью сдвига можно описать с помощью модели *степенной зависимости*

$$\mu_1' = K_{pl} (\dot{\gamma})^{n_{pl}-1} \quad (8.2-5)$$

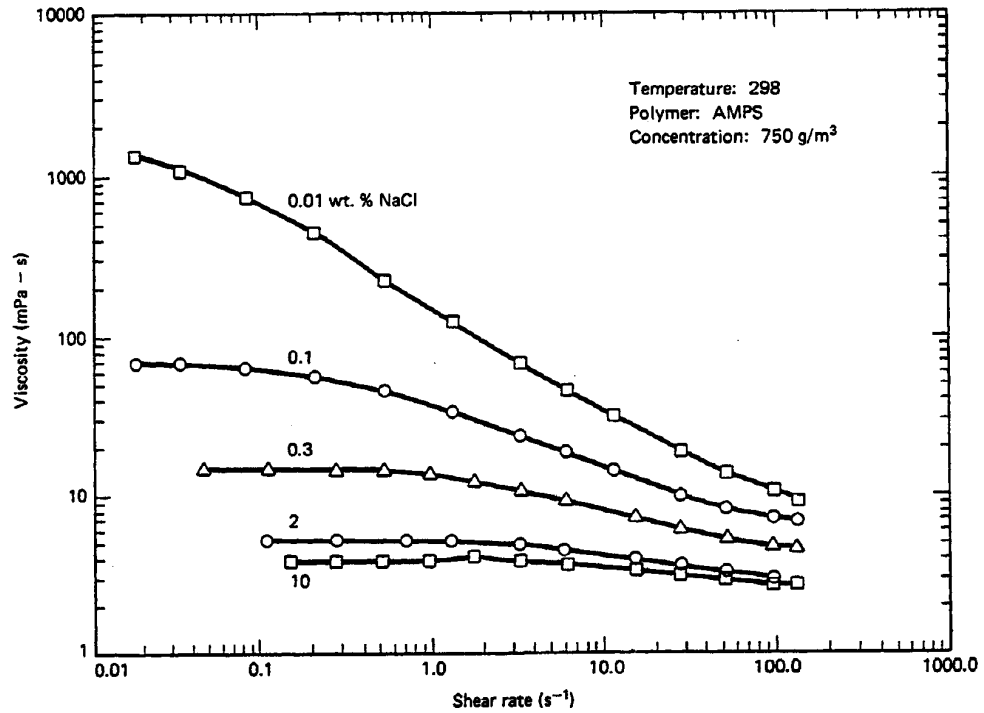


Рис.8-6 Зависимость вязкости полимерного раствора от скорости сдвига при разных минерализациях соляного раствора (Мартин и др., 1981)

где K_{pl} и n_{pl} - коэффициент степенной зависимости и показатель степени, соответственно. Для жидкостей, разжижающихся при сдвиге, $0 < n_{pl} < 1$; для ньютоновских жидкостей $n_{pl}=1$, а K_{pl} становится вязкостью. $\dot{\gamma}$ - всегда положительная величина. Уравнение (8.2-5) применяется только в ограниченном диапазоне скоростей сдвига: ниже некоей низкой скорости сдвига вязкость постоянна при μ_1^0 , а выше критической скорости сдвига вязкость тоже постоянна μ_1^∞ .

При некоторых расчетах степенной закон неудобен; для таких случаев имеется еще одна зависимость, которой можно воспользоваться – модель Метера (Метер и Берд, 1964)

$$\mu_1' = \mu_1^\infty + \frac{\mu_1^0 - \mu_1^\infty}{1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{1/2}}\right)^{n_M-1}} \quad (8.2-6)$$

где n_M - эмпирический коэффициент, а $\dot{\gamma}_{1/2}$ - скорость сдвига, при которой μ_1' - это среднее значение μ_1^0 и μ_1^∞ . Как и все свойства полимеров, все эмпирические параметры являются функциями минерализации, жесткости и температуры.

Вышеупомянутые общие тенденции и уравнения применимы и к потоку в проницаемой среде. μ_1' обычно называют кажущейся вязкостью μ_{app} , а эффективная скорость сдвига $\dot{\gamma}_{eq}$ основана на концепции капиллярной трубки, как мы вывели в Разделе 3-1 для ньютоновских жидкостей.

Для жидкостей, подчиняющихся степенному закону, процедура идентична (см. Пример 8В), за исключением того, что начальным уравнением является уравнение (8.2-5). Здесь мы приводим только результаты.

Кажущаяся вязкость текущего полимерного раствора равна

$$\mu_{app} = H_{pl} \cdot u^{n_{pl}-1} \quad (8.2-7)$$

где (Хирасаки и Поуп, 1974)

$$H_{pl} = K_{pl} \cdot \left(\frac{1+3 \cdot n_{pl}}{n_{pl}} \right)^{n_{pl}-1} \cdot (8 \cdot k_1 \cdot \phi_1)^{(1-n_{pl}/2)} \quad (8.2-8)$$

Правая часть уравнения (8.2-7) равна $K_{pl} \dot{\gamma}_{eq}^{n_{pl}-1}$, что дает эквивалентную скорость сдвига для потока жидкости, подчиняющейся степенному закону

$$\dot{\gamma}_{eq} = \left(\frac{1+3 \cdot n_{pl}}{n_{pl}} \right) \cdot \frac{u}{\sqrt{8 \cdot k_1 \cdot \phi_1}} \quad (8.2-9)$$

В обоих уравнениях (8.2-8) и (8.2-9) k_1 - проницаемость по водной фазе является произведением относительной фазовой проницаемости и абсолютной проницаемости. ϕ_1 - пористость, определяемая на основе проницаемости для водной фазы, равна ϕS_1 .

Единственным различием между эквивалентной скоростью сдвига и скоростью сдвига для ньютоновской жидкости (уравнение 3.1-11) является первый член в правой части уравнения. Этот коэффициент является медленно изменяющейся функцией n_{pl} ; поэтому скорость сдвига для ньютоновской жидкости дает превосходную аппроксимацию скорости сдвига в режиме неньютоновского потока.

Хотя $\dot{\gamma}_{eq}$ дается в обратных единицах времени, скорость сдвига является по существу отображением устойчивого состояния, т.к. она может быть реализована в установившемся ламинарном потоке в трубке. Таким образом, определяющие уравнения (8.2-5) и (8.2-6) отображают чисто вязкостные эффекты, т.к. мгновенное изменение $\dot{\gamma}_{eq}$ вызывает аналогичное изменение μ' . На самом деле колебания в $\dot{\gamma}_{eq}$ или упругие эффекты действительно влияют на свойства полимера, что мы рассмотрим отдельно ниже.

Перенос полимера

Все полимеры удерживаются в проницаемой среде из-за адсорбции на твердую поверхность или в результате улавливания в мелких порах. Удерживание полимера зависит от типа полимера, молекулярного веса, состава породы, минерализации раствора, жесткости раствора, скорости течения и температуры. Величина удерживания полимера, замеренная в промышленных условиях, может колебаться от 7 до 150 $\mu\text{г}$ полимера на см^3 объема насыпного материала; оптимальным считается уровень удерживания менее 20 $\mu\text{г}/\text{см}^3$. Удерживание является причиной потери полимера из раствора, что может привести к утрате регулирования подвижности – эффекту особенно резко выраженному при низких концентрациях полимера. Удерживание полимера, кроме того, вызывает замедление распространения полимера и образовавшегося нефтяного вала (см. Раздел 8-4).

Для более точного определения количества мы представим адсорбцию полимера с помощью изотермы ленгмюровского типа

$$C_{4s} = \frac{a_4 \cdot C_4}{1 + b_4 \cdot C_4} \quad (8.2-10)$$

где C_4 и C_{4s} - концентрации вещества в водной и твердой фазах. Единицы измерения адсорбции могут быть самыми разнообразными, но наиболее употребительной является масса полимера на массу породы. В наших записях – это, собственно говоря, $\omega_{4s} / (1 - \omega_{4s})$, но ω_{4s} гораздо меньше 1. Единицы преобразования $C_{4s} (г/м^3)$ и $\omega_{4s} (\muг/г \text{ породы})$ заложены в константы a_4 и b_4 . b_4 в уравнении (8.2-10) регулирует кривизну изотермы, а отношение a_4 / b_4 определяет пологий участок кривой для расчета адсорбции (Рис.8-7).

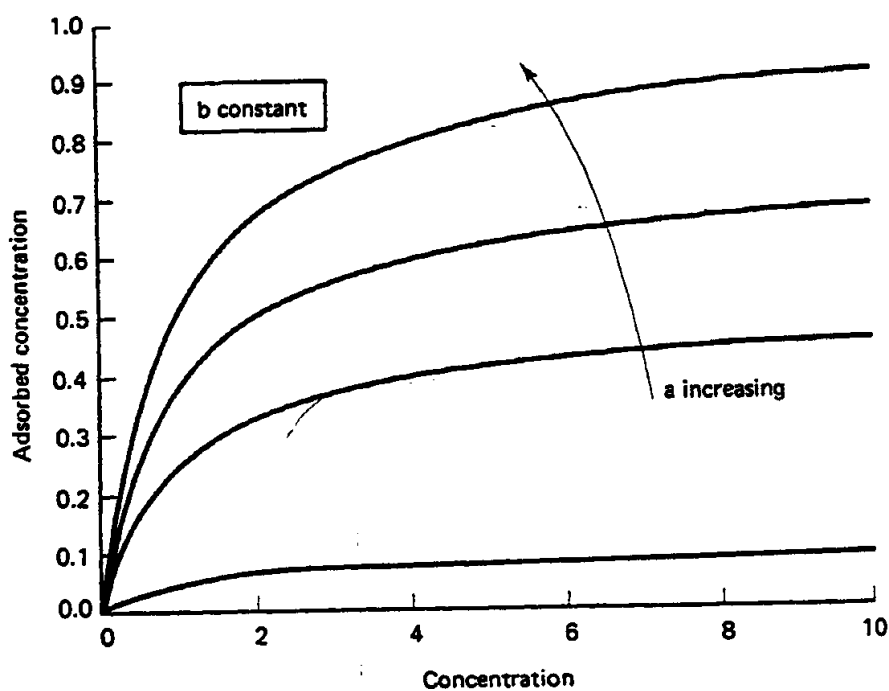
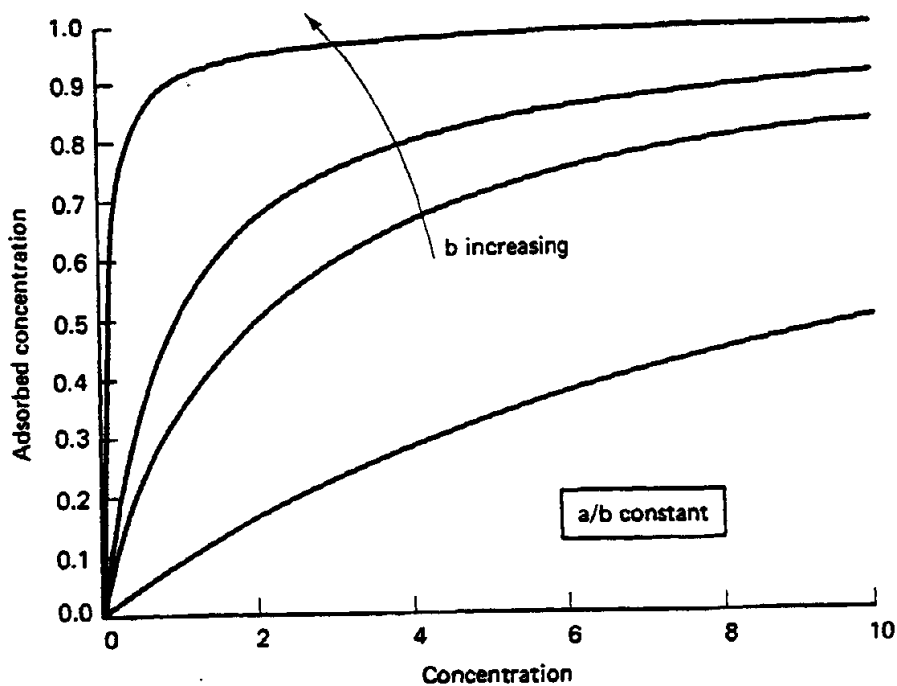


Рис.8-7 Типичные формы изотермы Ленгмюра

В исходной теории Ленгмюра адсорбция, определяемая по пологому участку кривой, соответствовала монослойному охвату поверхности физической адсорбцией (см. Пример 8С). Учитывая анионный характер водорастворимых полимеров, адсорбция, скорее всего, является химической адсорбцией, описываемой изотермой обмена типа уравнения (3.5-4). По существу, адсорбция полимера увеличивается с увеличением минерализации и жесткости, но замеренные охваты поверхности гораздо меньше монослойного охвата. Кроме того, неизвестно, обратима ли адсорбция. Отсюда, уравнение (8.2-10) и Рис.8-7 представляют собой просто эмпирические отображения физических наблюдений. (Отсюда происхождение термина *ленгмюровский тип*.) Типичные изотермы адсорбции полимера довольно крутые: т.е. они достигают пологого участка при очень низком C_4 . Приведенные выше величины адсорбции полимера, относятся к адсорбции, определяемо пологим участком кривой.

Уравнение (8.2-10) представляет собой обобщенную функцию изотермы. Частная форма зависит от единиц измерения удерживания; к сожалению, стандартной формы для этого не существует. общепринятые способы представления данных об удерживании полимера следующие:

$$\frac{\text{масса полимера}}{\text{масса твердой фазы}} = \frac{\omega_{4s}}{(1 - \omega_{4s})}$$

$$\frac{\text{масса полимера}}{\text{площадь поверхности}} = \frac{\omega_{4s}}{a_v}$$

$$\frac{\text{масса полимера}}{\text{объем насыпного материала}} = \omega_{4s} \rho_s (1 - \phi)$$

$$\frac{\text{масса полимера}}{\text{порový объем}} = \frac{\omega_{4s} \rho_s (1 - \phi)}{\phi} = C_{4s}$$

$$\frac{\text{Объем полимерного раствора}}{\text{порový объем}} = \frac{\omega_{4s} \rho_s (1 - \phi)}{(\phi C_4)} = D_4$$

Последний часто называют *потерей на фронте продвижения*.

Недоступный порový объем

Замедление распространения полимера в проницаемой среде, вызванное удерживанием полимера, компенсируется ускорением прохождения полимерного раствора через проницаемую среду, обусловленным *недоступным порovým объемом*. Наиболее общее объяснение недоступного порového объема заключается в том, что малые участки порového пространства не дают молекулам полимера проникать в них из-за их размера. Таким образом, какая-то часть всего порového пространства остается незатронутой или недоступной для полимера, и в результате происходит ускоренное течение полимера. Другое объяснение недоступного порového объема основано на эффекте исключения пристенной области из зоны течения, в силу чего молекулы полимера агрегируются в центре узкого канала (Дуда и др., 1981). Слой полимерной жидкости у стенки поры имеет меньшую вязкость, чем жидкость в центре, что вызывает кажущееся проскальзывание жидкости.

Недоступный порový объем зависит от молекулярного веса полимера, проницаемости среды, пористости и распределения пор по размерам, и становится более резко выраженным по мере того как молекулярный вес увеличивается, а отношение проницаемости к пористости (характеристический размер пор) уменьшается. В

предельных случаях недоступный поровый объем может составлять 30% от всего порового пространства.

Уменьшение проницаемости

Для многих полимеров данные зависимости вязкости от скорости сдвига, полученные на вискозиметре (μ_1' в зависимости от $\dot{\gamma}$), и данные, полученные в опыте по фильтрации (μ_{app} в зависимости от $\dot{\gamma}_{eq}$), дадут по существу одну и ту же кривую. Но в случае с частично гидролизованными полиакриламидами кривая, полученная на вискозиметре, будет смещена относительно кривой, полученной при фильтрации через проницаемую среду, на значительную и постоянную величину. Полимер, очевидно, в какой-то степени вызывает уменьшение проницаемости, что уменьшает подвижность помимо увеличения вязкости.

Фактически уменьшение подвижности является только одной из трех характеристик потока в проницаемой среде (Дженнингс и др., 1971). *Фактор сопротивления* R_F - это отношение фильтруемости минерализованной воды к фильтруемости однофазного полимерного раствора, текущего в тех же условиях

$$R_F = \frac{\lambda_1}{\lambda_1'} = \lambda_1 \cdot \mu_{app} = \left(\frac{k_1}{\mu_1} \right) \cdot \left(\frac{\mu_1'}{k_1'} \right) \quad (8.2-11)$$

Для опытов, проводимых при постоянных скоростях потока, R_F равно обратному отношению перепадов давления; для опытов, проводимых при постоянных перепадах давления, R_F является отношением скоростей потока. R_F - это показатель вклада полимера в общее уменьшение подвижности. Чтобы описать только эффект уменьшения проницаемости, коэффициент уменьшения проницаемости R_k определяется как

$$R_k = \frac{k_1}{k_1'} = \frac{\mu_1'}{\mu_1} \cdot R_F \quad (8.2-12)$$

Окончательно этот коэффициент определяется как *остаточный фактор сопротивления* R_{RF} , который равен подвижности соленой воды до и после (λ_{1a}) закачки полимера

$$R_{RF} = \frac{\lambda_1}{\lambda_{1a}} \quad (8.2-13)$$

R_{RF} указывает на то, что за счет полимерного раствора произошло уменьшение проницаемости. Остаточный фактор сопротивления является основным критерием того, что произошла закупорка каналов течения за счет применения полимерного раствора. Во многих случаях R_k и R_{RF} почти равны, а R_F обычно гораздо больше R_k , т.к. содержит оба эффекта – эффект увеличения вязкости и эффект уменьшения проницаемости.

Наиболее общим критерием уменьшения проницаемости является R_k , который чувствителен к типу полимера, молекулярному весу, степени гидролиза, скорости сдвига и поровой структуре проницаемой среды. Полимеры, которые претерпели даже незначительную механическую деструкцию, по-видимому, теряют почти всю свою способность уменьшать проницаемость. По этой причине, для оценки качества полимера, обычно проводят его испытания на скрин-вискозиметрах.

Скрин-вискозиметр представляет собой два стеклянных шарика на стеклянной пипетке, как показано на Рис.8-8. В трубку в нижней части прибора вставляют несколько

довольно грубых проволочных сит, через которые должен просачиваться полимерный раствор.

Чтобы воспользоваться прибором, раствор засасывают через сита до тех пор, пока уровень раствора не будет выше верхней установочной метки. Затем раствору дают течь свободно, и записывают время t_d , требуемое для того, чтобы раствор прошел от верхней метки до нижней. Затем скрин-фактор для полимерного раствора определяется как

$$S_F = \frac{t_d}{t_{ds}} \quad (8.2-14)$$

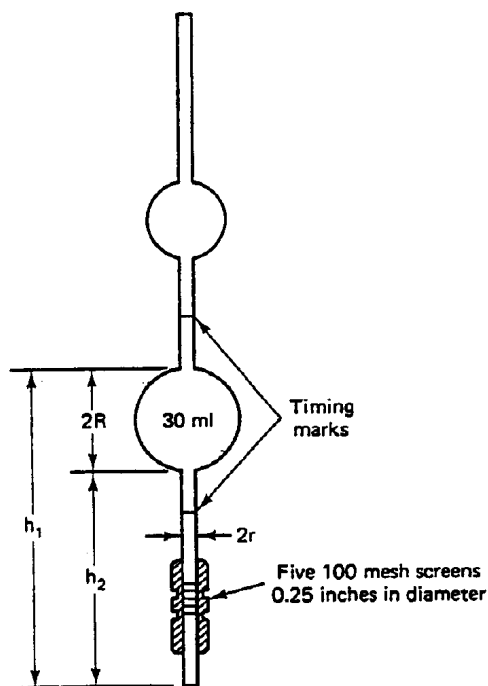


Рис.8-8 Прибор для определения скрин-фактора (Фоши и др., 1970)

где t_{ds} - аналогичное время для раствора, не содержащего полимер. Из-за нормализации скрин-факторы не зависят от температуры, размеров прибора и крупности сит, и в достаточной мере не зависят от расположения сит. Скрин-фактор зависит от концентрации полимера, но его главная цель измерить ту часть конфигурации полимерного раствора, которая зависит от времени, т.е. он измеряет скорость, с какой молекула полимера возвращается к своей конфигурации в установившемся потоке после возмущенного состояния. Это время релаксации явно очень быстрое для полисахаридов, т.к. у них нет измеримого скрин-фактора даже при высоких концентрациях. Частично гидролизованные полиакриламиды имеют гораздо более медленное время релаксации, т.к. их скрин-факторы могут быть большими даже при той же вязкости, что и у раствора полисахарида. Вышеприведенные объяснения согласуются с химическими свойствами двух групп полимеров, приведенных в Разделе 8-1, и могут использоваться для вывода чувствительности скрин-факторов к минерализации и жесткости растворов.

Скрин-факторы особенно чувствительны к изменениям самой полимерной молекулы. Одним из определений качества полимера является отношение скрин-фактора полимера, претерпевшего деструкцию, к скрин-фактору недеструктированного полимера. Это применение имеет особенно большое значение там, где невозможно использовать более сложное оборудование.

Другим применением скрин-фактора является его использование в качестве коррелятора для R_F и R_{RF} (Рис.8-9). Объяснение для такой корреляции согласуется с объяснением, приведенным выше к вопросу о релаксации полимера.

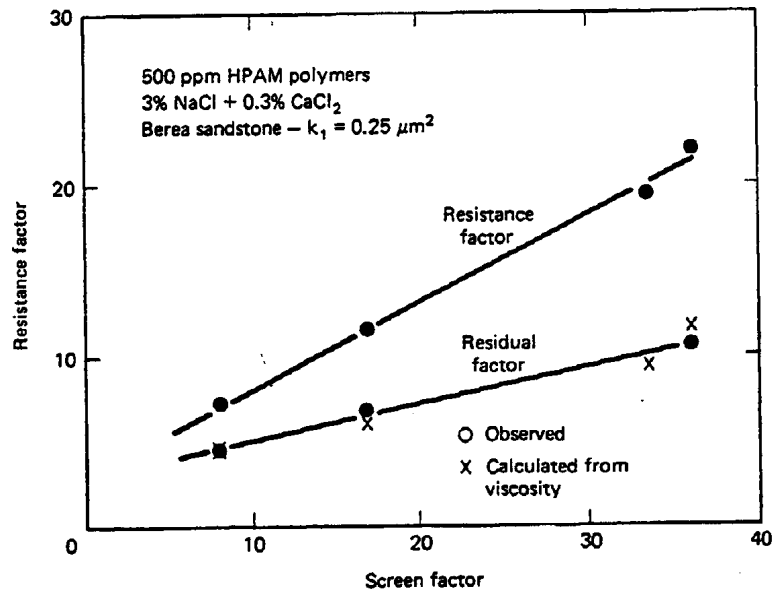


Рис.8-9 Корреляция факторов сопротивления с помощью скрин-факторов (Дженнингс и др.,1971)

В поровом масштабе установившийся поток в проницаемой среде фактически представляет собой последовательность суживающихся и расходящихся каналов. Частота, с которой раствор испытывает эти сжатия, в сравнении с временем релаксации полимера, определяет степень уменьшения проницаемости. Этот эффект, кроме того, объясняет с качественной точки зрения увеличение вязкости, определяемой на вискозиметре, при очень высоких скоростях сдвига (Хирасаки и Поуп, 1974).

Аргумент времени релаксации не может полностью объяснить уменьшение проницаемости, потому что эти эффекты наблюдались в стеклянных капиллярах. В этом случае уменьшение проницаемости, по-видимому, вызывалось адсорбцией полимера, которая уменьшает эффективный размер поры (см. Пример 8Е).

Здравый вопрос заключается в том, является ли уменьшение проницаемости желательным эффектом. R_k , которое чувствительно даже к малейшим ухудшениям качества полимера, регулировать трудно. Кроме того, чрезмерно большое R_k вызовет ухудшение фильтруемости. Но можно получить намеченную заранее степень регулирования подвижности при использовании меньшего количества полимера, если $R_k > 1$. Если M_T^0 является целевым конечным соотношением подвижностей:

$$M_T^0 = \left(\frac{k_1'}{\mu_1^0} \right) \cdot \left(\frac{\mu_2}{k_2^0} \right) = \frac{M^0|_{R_k=1}}{R_k} = \frac{M^0}{R_{RF}} \quad (8.2-15)$$

В этом уравнении $M^0|_{R_k=1}$ - это отношение подвижностей при использовании полимера, не дающего уменьшение проницаемости, и M^0 - отношение подвижностей воды и нефти в конечной точке. Несомненно, если $R_k > 1$, то вязкость полимера μ_1^0 может быть меньше, чем в случае, если $R_k=1$, что означает, что при заданной концентрации частично гидролизованый полиакриламид даст меньшее отношение подвижностей, чем полисахарид в условиях, когда оба полимера имеют одинаковую вязкость в потоке. Отметим, что предельная вязкость μ_1^0 используется для определения M^0 из уравнения (8.2-15).

Химическая и биологическая деструкция

Средняя молекулярная масса полимера может быть уменьшена в ущерб всему процессу в результате химической, биологической или механической деструкции. Мы используем термин *химическая деструкция*, обозначающий любой из нескольких возможных процессов, как, например, термическое окисление, замещение свободного радикала, гидролиз, и *биологическая деструкция*.

Для конкретного полимерного раствора существует некая температура, выше которой полимер фактически разрушается под действием температуры. Хотя не очень точно, но установлено, что для большинства полимеров, применяемых для повышения нефтеотдачи, эта температура довольно высока, порядка 400⁰F. Т.к. первоначальная температура нефтяных пластов почти всегда ниже этого предела, большой практический интерес для полимерного заводнения представляет собой температура, при которой происходят другие типы деструкции.

Среднее время пребывания в пласте, как правило, очень большое, порядка нескольких лет, поэтому даже медленно протекающие реакции потенциально имеют большое значение. Скорости реакции, кроме того, сильно зависят от других переменных, например, рН или жесткости. При нейтральном рН деструкция очень часто бывает незначительной, тогда как при очень низком или высоком рН, и особенно при высоких температурах, она бывает значительной. В случае частично гидролизованных полиакриламидов гидролиз разрушит тщательно подобранную степень гидролиза, присутствующую в исходном продукте. Чувствительность к жесткости возрастет, а вязкость резко уменьшится. Для ксантановой смолы гидролиз имеет еще более серьезные последствия, так как основная цепь полимера разъединяется, что приводит к очень сильному уменьшению вязкости.

Таблица 8-1 Отобранные бактерициды и поглотители кислорода (из материалов Национального Совета по нефти (США) по вопросам повышения нефтеотдачи, 1984)

Бактерицид	Поглотители кислорода
Употребительные	
Акролеин	Гидразин
Формальдегид	Бисульфит натрия
Дихлорфенол натрия	Гидросульфит натрия
Пинтахлорфенол натрия	Двуокись серы
Предлагаемые или используемые нечасто	
Ацетаты кокосовых аминов	
Ацетаты кокосовых диаминов	
Ацетаты диаминов китайского сального дерева	
Алкил-аминосодержащие соединения	
Алкилдиметил аммоний хлорид	
Алкилфосфаты	
Сульфат кальция	
Кокосовый диметиламмонийхлорид	
Глутеральдегид	
Параформальдегид	
Гидроокись натрия	
Натриевые соли фенолов	
Замещенные фенолы	

Окисление или свободно-радикальные химические реакции обычно считаются наиболее серьезным источником деструкции. Поэтому для предотвращения или замедления этих реакций часто добавляют поглотители кислорода или антиокислители. Эти химические вещества являются сильными восстановителями и имеют дополнительное преимущество, заключающееся в том, что они восстанавливают катионы железа с +3 до +2. Они в свою очередь помогают предотвратить гелеобразование, агломерацию и другие нежелательные эффекты, которые могут вызвать закупорку ствола скважины и привести к снижению приемистости. Уэллингтон (1980) обнаружил, что спирты, например, изопропанол и сернистые соединения, например, тиомочевина, являются хорошими антиокислителями и ингибиторами свободно-радикальной полимеризации.

Лабораторные результаты показывают, что ксантан может оставаться стойким при температуре вплоть до 367 К, а частично гидролизованный полиакриламид – при температуре примерно до 394 К. В случае ксантана результаты сильно зависят от точных условий, таких как минерализация и рН, причем наиболее благоприятными условиями являются высокая минерализация и рН в диапазоне от 7 до 9. Несомненно, для того, чтобы определить предполагаемое поведение, нужно проверить конкретный раствор полимера в конкретных пластовых условиях.

Биологическая деструкция может иметь место как в случае частично гидролизованных полиакриламидов, так и в случае полисахаридов, но вероятность ее больше в последнем случае. Переменные, влияющие на биологическую деструкцию, включают в себя тип бактерий, присутствующих в растворе, давление, температуру, минерализацию и наличие других химических веществ. Как и в случае обычного заводнения, рекомендуется профилактическое применение биоцида. Часто применяют слишком малое количество биоцида, или его начинают применять слишком поздно, и возникающие проблемы почти невозможно исправить. В Таблице 8-1 представлен перечень типичных добавок в полимерном заводнении.

Механическая деструкция

Механическая деструкция потенциально присутствует во всех применениях. Она происходит, когда полимерные растворы подвергаются действию высоких скоростей потока, которые наблюдаются в наземном оборудовании (клапаны, измерительные диафрагмы, насосы или система труб), в призабойных условиях (перфорации или сетчатые фильтры) или на поверхности нефтеносного песчаного пласта. Перфорации в скважине, в частности, являются причиной для беспокойства, т.к. большие количества полимерного раствора проталкиваются через несколько небольших отверстий. По этой причине большинство закачек полимера осуществляется через скважины с необсаженным забоем или скважины с гравийным фильтром. Полимерный раствор, который предварительно был подвергнут частичному действию сдвига, может деструктурировать в меньшей степени. Т.к. скорость потока быстро уменьшается с пройденным расстоянием от нагнетательной скважины, в самом пласте механическая деструкция незначительна.

Все полимеры проявляют тенденцию к механической деструкции при достаточно высоких скоростях течения. Но частично гидролизованные полиакриламиды в наибольшей степени подвержены механической деструкции в нормальных эксплуатационных условиях, особенно при высокой минерализации и жесткости воды. Очевидно, ионное соединение этих анионных молекул довольно хрупкое. Кроме того, продольное напряжение является таким же разрушающим для полимерных растворов, как и напряжение при сдвиге, хотя оба этих вида как правило сопровождают друг друга. Маеркер (1976) и Серит (1983) установили соотношение между постоянной потерей вязкости полимерного раствора и произведением скорости продольного растяжения на длину. На графике зависимости вязкости от скорости сдвига (чисто сдвиговой поток)

механическая деструкция обычно начинается при скоростях сдвига, равных или несколько меньших, чем скорость сдвига, дающая минимальную вязкость.

8-3 Расчет приемистости при полимерном заводнении

Экономический успех всех процессов повышения нефтеотдачи очень сильно связан с продолжительностью проекта или скоростью закачки, но полимерное заводнение особенно зависит от этого фактора. Во многих случаях стоимость самого полимера вторична по сравнению с текущей стоимостью дополнительной нефти. Из-за этого промышленным заводнениям часто предшествуют испытания пласта на приемистость, проводимые на одной скважине. Здесь мы приведем простой способ анализа испытаний на приемистость, основанный на физических свойствах, описанных в предыдущем разделе.

Приемистость скважины определяется как

$$I \equiv \frac{i}{\Delta P} \quad (8.3-1)$$

где i - объемная скорость закачки в скважину, а ΔP - перепад давления между давлением течения на забое скважины и каким-то эталонным давлением. I_r - показатель падения приемистости, предполагаемое при закачке полимера. Как I , так и I_r - это функции времени, но долгосрочный предел I_r для ньютоновского полимерного раствора - это просто отношение вязкостей, если скин-эффекты невелики. Однако конечная величина I_r для фактического полимерного раствора может быть выше расчетной из-за сдвигового разжижения.

$$I_r = \frac{I}{I_1} \quad (8.3-3)$$

Мы сделаем несколько упрощающих допущений, многие из которых могут быть ослаблены (Бондор и др., 1972). Скважина радиусом R_w , приемистость которой нам нужно определить, расположена в горизонтальной однородной радиальной зоне радиусом R_e . Давления в R_e и R_w равны соответственно P_e и P_{wf} . P_e - постоянная величина (установившийся поток), а P_{wf} может изменяться во времени. Жидкость, текущая в пласте, представляет собой единую водную несжимаемую фазу при остаточной нефтенасыщенности, реологические свойства которой не зависят от давления. Дисперсия и адсорбция полимера незначительны, хотя полимер может продемонстрировать уменьшение проницаемости. Поток одномерный и радиальный. И, наконец, весь диапазон скоростей сдвига в пласте подчиняется степенному закону; следовательно, уравнение (8.2-7) описывает кажущуюся вязкость.

С учетом этих допущений уравнение непрерывности (2.4-11) преобразуется до:

$$\frac{d}{dr}(ru_r) = 0 \quad (8.3-3)$$

где u_r - радиальный объемный поток. Это уравнение предполагает, что объемная скорость не зависит от r и равна i , т.к.

$$i = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot H_i \cdot u_r \quad (8.3-4a)$$

Уравнение (8.3-4a) является следствием допущения несжимаемого потока; однако i зависит от времени. Подставим закон Дарси из уравнения (8.2-7) для u_r в уравнение (8.3-4a)

$$i = -\frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot H_t \cdot k_1'}{\mu_{app}} \frac{dP}{dr} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot H_t \cdot k_1}{H_{pl} \cdot u_r^{n_{pl}-1} \cdot R_k} \frac{dP}{dr} \quad (8.3-4b)$$

Это уравнение определено, так что i является положительной величиной. Коэффициент уменьшения проницаемости вводится с помощью уравнения (8.2-12). Убирая u_r при использовании уравнения (8.3-4a), получаем обычное дифференциальное уравнение, которое может быть интегрировано между произвольными пределами P_1 при r_1 и P_2 при r_2 .

$$P_2 - P_1 = \left(\frac{i}{2 \cdot \pi \cdot H_t} \right)^{n_{pl}} \cdot \frac{H_{pl} \cdot R_k}{k \cdot (1 - n_{pl})} \cdot (r_1^{1-n_{pl}} - r_2^{1-n_{pl}}) \quad (8.3-5a)$$

Пределом ньютоновского потока, $n_{pl} = 1 = R_k$ и $H_{pl} = \mu_1$, в этом уравнении является знакомое уравнение установившегося радиального потока.

$$P_2 - P_1 = \frac{i \cdot \mu_1}{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot H_t} \cdot \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (8.3-5b)$$

Теперь применим эти уравнения к фильтруемости полимера при заводнении.

В какое-то время t во время закачки фронт полимера (предположительно острый) будет находиться в радиальном положении R_p , где

$$\int_0^t i dt = \pi \cdot (R_p^2 - R_w^2) \cdot H_t \cdot \phi \cdot (1 - S_{2r}) \quad (8.3-6)$$

Левая часть этого уравнения представляет собой суммарный объем закачанного полимерного раствора. Поэтому, уравнение (8.3-5a) применяется в диапазоне $R_w < r < R_p$, а уравнение (8.3-5b) применяется в кольцевом пространстве $R_p < r < R_e$.

При соответствующей идентификации переменных мы получаем для второй области

$$R|_{R_p} - P_e = \frac{i \cdot \mu_1}{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot H_t} \cdot \ln \left(\frac{R_e}{R_p} \right) \quad (8.3-7a)$$

а для первой

$$P_{wf} - R|_{R_p} = \left(\frac{i}{2 \cdot \pi \cdot H_t} \right)^{n_{pl}} \cdot \frac{H_{pl}}{k_1 \cdot (1 - n_{pl}) \cdot R_k} \cdot (R_p^{1-n_{pl}} - R_w^{1-n_{pl}}) \quad (8.3-7b)$$

где $P|_{R_p}$ - давление на фронте полимер – вода. Сложение этих двух уравнений дает общий перепад давления от R_w до R_e .

$$P_{wf} - P_e = \left(\frac{i}{2 \cdot \pi \cdot H_t} \right)^{n_{pl}} \cdot \frac{H_{pl}}{k_1 \cdot (1 - n_{pl}) \cdot R_k} \cdot (R_p^{1-n_{pl}} - R_w^{1-n_{pl}}) + \frac{i \cdot \mu_1}{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot H_t} \cdot \left(\ln \left(\frac{R_e}{R_p} \right) + s_w \right) \quad (8.3-8)$$

где s_w - природный скин-фактор скважины – введен для того, чтобы можно было учесть повреждение скважины.

Уравнение (8.3-8), подставленное в определение фильтруемости (уравнение 8.3-1) дает

$$I^{-1} = \left(\frac{i}{2 \cdot \pi \cdot H_t} \right)^{n_{pl}} \cdot \frac{H_{pl}}{i \cdot (1 - n_{pl}) \cdot k_1} \cdot (R_p^{1-n_{pl}} - R_w^{1-n_{pl}}) + \frac{\mu_1}{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot H_t} \cdot \left(\ln \left(\frac{R_e}{R_p} \right) + s_w \right) \quad (8.3-9)$$

Фильтруемость воды I_1 дается уравнениями (8.3-1) и (8.3-5b) при $r_1 = R_w$ и $r_2 = R_e$. Эта величина и величина I , рассчитанная из уравнения (8.3-9), дают выражение для I_r при использовании уравнения (8.3-6). Обе величины - как I , так и I_r - связаны с суммарной закачкой полимерного раствора (иди временем) через уравнение (8.3-6).

8-4 Движение отдельных фаз в процессах полимерного заводнения

Трактовка движения отдельных фаз в многофазовом потоке при полимерном заводнении напоминает трактовку движения потока воды – растворитель, приведенную в Разделе 7-7. Добавляются лишь два термина – удерживание полимера и недоступный поровый объем. В этом разделе мы применяем обычные допущения, принимаемые для движения отдельных фаз в многофазовом потоке, а именно: одномерный поток, несжимаемая жидкость и порода и недиссипативное смешивание.

Однофазный поток

Сначала рассмотрим случай, когда водорастворимые вещества адсорбируются из раствора по изотерме Лэнгмюра. Изотерма представлена уравнением (8.2-10).

Пусть поток будет таким, чтобы концентрация вещества C_{4I} вытеснялась концентрацией вещества C_{4J} в виде однофазного потока, где $C_{4J} > C_{4I}$. Из уравнения (5.4-5a) удельная скорость концентрирования C_4 равна

$$v_{C_4} = \left(1 + \frac{(1-\phi)\rho_s}{\phi} \frac{d\omega_{4s}}{dC_4} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{dC_{4s}}{dC_4} \right)^{-1}$$

Из уравнения (8.2-10) удельная скорость принимает вид

$$v_{C_4} = \left(1 + \frac{C_4}{(1+b_4 \cdot C_4)^2} \right)^{-1} \quad (8.4-1)$$

Но, т.к. $C_{4J} > C_{4I}$, мы получаем $v_{C_4}|_J > v_{C_4}|_I$, вытеснение представляет собой импульс; в случае $C_{4J} < C_{4I}$ (см. Пример 8J), вытеснение было бы распространяющейся волной. Но при C_{4J} , вытесняющей C_{4I} , фронт между C_{4J} и C_{4I} движется с удельной скоростью

$$v\Delta_{C_4} = \left(1 + \frac{(1-\phi)\rho_s}{\phi} \frac{d\omega_{4s}}{dC_4} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{\Delta C_{4s}}{\Delta C_4} \right)^{-1} \quad (8.4-2)$$

как следует из уравнения (5.4-5b). В этом уравнении $\Delta() = ()_J - ()_I$. Если, как обычно и происходит при полимерных заводнениях, $C_{4I} = 0$, то уравнение (8.4-2) принимает вид

$$v\Delta_{C_4} = \frac{1}{1 + \frac{(1-\phi)\rho_s}{\phi} \left(\frac{\omega_{4s}}{C_4} \right)_J} = \frac{1}{1 + D_4} \quad (8.4-3)$$

где D_4 - потеря полимера на фронте продвижения. Это также называется коэффициентом запаздывания, т.к. адсорбция является причиной того, что скорость фронта ниже скорости идеального смешивающегося вытеснения (см. Раздел 5-4). D_4 является одной из наиболее удобных концепций как в полимерном, так и в мицеллярно-полимерном заводнении, т.к. она выражает удерживание в единицах порового объема, согласующихся с размером оторочки.

Двухфазный поток

Трактовка движения отдельных фаз в многофазовом потоке в этом случае будет включать в себя две фазы (водную $j = 1$ и олеиновую $j = 2$) и три компонента (воду $i = 1$, нефть $i = 2$ и полимер $i = 4$). Пусть проницаемая среда имеет равномерную исходную водонасыщенность, равную S_{1l} . Мы закачиваем полимерный раствор, не содержащий нефти ($S_{1l} = 1 - S_{2r}$). Начальная общая концентрация полимера равна 0, а концентрация полимера в водной фазе составляет C_{4j} . Полимер и вода не растворяются в нефти ($C_{12} = C_{42} = 0$); нефть не растворяется в водной фазе ($C_{21} = 0$).

Действие недоступного порового объема

Пористость для водной фазы равна ϕS_1 . Только часть этой доли порового объема ($\phi S_1 - \phi_{IPV}$) доступна для полимера; поэтому общая концентрация полимера на единицу объема равна

$$W_4 = (\phi \cdot S_1 - \phi_{IPV}) \cdot \rho_1 \cdot \omega_{41} + (1 - \phi) \cdot \rho_s \cdot \omega_{4s} \quad (8.4-4a)$$

Аналогичным образом, общая концентрация воды составляет

$$W_1 = (\phi \cdot S_1 - \phi_{IPV}) \cdot \rho_1 \cdot (1 - \omega_{41}) + \phi_{IPV} \cdot \rho_1 \quad (8.4-4b)$$

т.к. только вода присутствует в исключенном поровом объеме ϕ_{IPV} . Но недоступный поровый объем свободно можно отбросить в уравнении (8.4-4b), т.к. концентрация полимера очень мала ($\omega_{41} \cong 1$). Общая концентрация нефти и уравнения (8.4-4a) и (8.4-4b) складываются в пористость, как требуется допущением несжимаемого потока.

Вытеснение нефти

Сам по себе полимер не изменяет относительной проницаемости ни по воде, ни по нефти, т.к., как мы наблюдали в Разделе 3-4, кажущаяся вязкость не может быть увеличена в такой степени, чтобы изменить остаточные фазовые насыщенности. Кроме того, когда уменьшение проницаемости значительно, это относится ко всему диапазону насыщенностей, но лишь к смачивающей фазе (Шнайдер и Оуэнс, 1982). Поэтому мы можем построить кривую движения потока полимерный раствор – нефть (полимер – нефть), используя кажущуюся вязкость вместо вязкости воды, и разделив k_{r1} на R_k . На Рис.8-10 представлены кривые движения потоков вода – нефть ($f_1 - S_1$) и полимер – нефть ($f_1^p - S_1$).

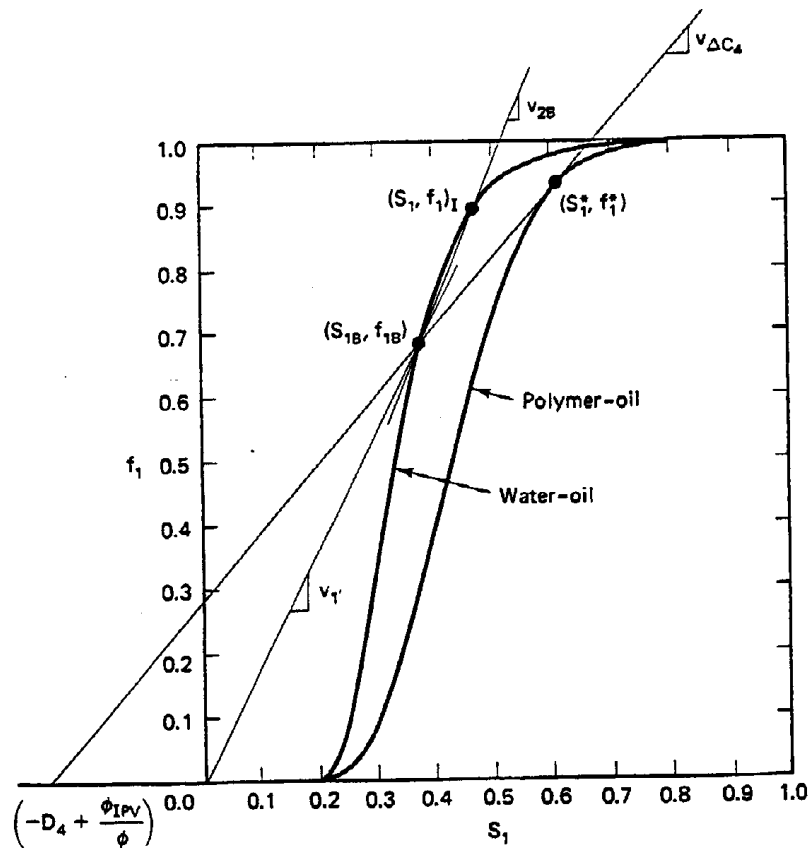


Рис.8-10 Графическое построение движения отдельных фаз в многофазовом потоке при полимерном заводнении

Т.к. адсорбция полимера протекает по лэнгмюровскому типу, и т.к. полимер вытесняет погребенную воду смешивающимся образом, фронт полимера является поршнеобразным и имеет удельную скорость, равную

$$v_{\Delta C_4} = \frac{f_1^p(S_1^*)}{S_1^* + D_4 - \phi_e} \quad (8.4-5a)$$

где D_4 - коэффициент запаздывания полимера, определяемый уравнением (8.4-3),

а

$$\phi_e = \frac{\phi_{IPV}}{\phi} \quad (8.4-5b)$$

S_1^* и $f_1^p(S_1^*)$ - водонасыщенности и движение отдельных фаз на фронте импульса полимера. S_1^* может также рассматриваться в качестве точки на распространяющейся части смешанной волны полимера и нефти, которую дает уравнение Баклея – Леверетта, откуда по уравнению (8.4-5) мы можем определить S_1^*

$$v_{\Delta C_4} = \frac{f_1^p(S_1^*)}{S_1^* + D_4 - \phi_e} = \left(\frac{df_1^p}{dS_1} \right) \Big|_{S_1^*} = v_{C_1} \quad (8.4-6)$$

т.к. S_1^* также находится в импульсной части волны полимера – нефти. В трактовке Баклея – Леверетта, приведенной в Разделе 5-2, использовался аналогичный аргумент.

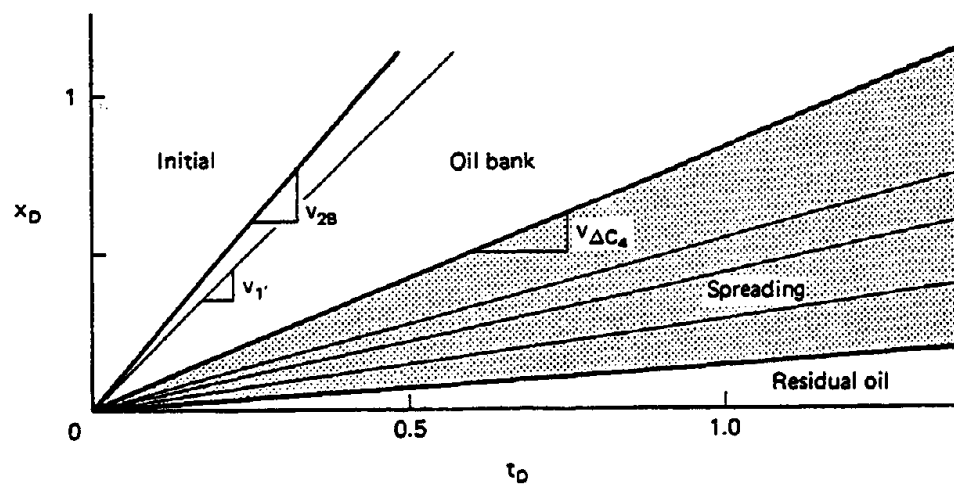
Уравнение (8.4-6) определит также насыщенность в нефтяном вале, т.к. S_2 будет прерывисто изменяться в зависимости от скорости, определяемой как

$$v_{\Delta C_2} = \frac{f_1^p(S_1^*) - f_1(S_{1B})}{S_1^* - S_{1B}} = v_{C_1} \quad (8.4-7)$$

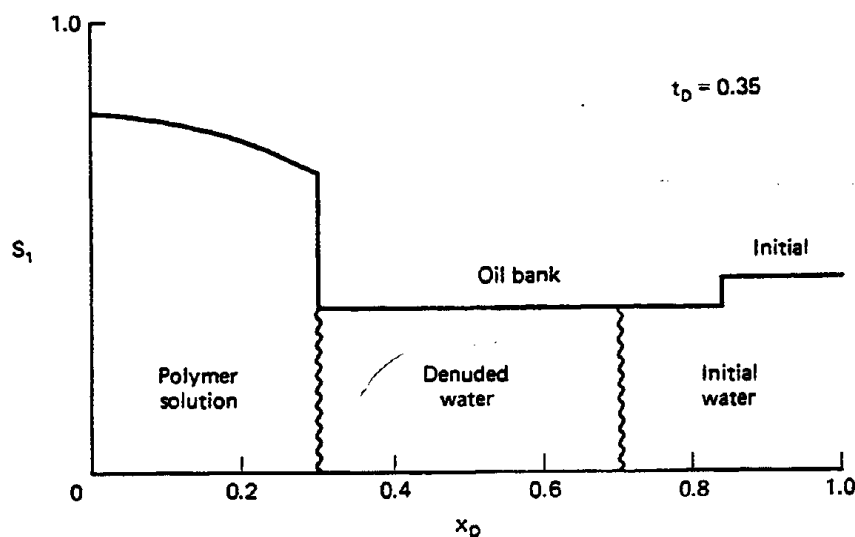
Уравнения (8.4-6) и (8.4-7) являются частными формулировками условия когерентности (уравнение 5.6-14).

Как и в случае вала растворитель – вода, рассматриваемом в Разделе 7-7, скорость фронта вала нефти (или воды) дается как

$$v_{\Delta C_2} = \frac{f_{1B} - f_{1I}}{S_{1B} - S_{1I}} = v_{\Delta C_1} \quad (8.4-8)$$



(a) Диаграмма время – расстояние



(b) Профиль насыщенности и концентрации

Рис.8-11 Рисунки для кривых изменения доли фазы в многофазном потоке, представленных на Рис.8-10

для поршнеобразного фронта вала нефти. К построению приступаем так же, как и в Разделе 7-7. На Рис.8-11 показана диаграмма время – расстояние и профиль состава при $t_D = 0.35$ для построения, представленном на Рис.8-10.

Хотя построение на Рис.8-10 и 8-11 является прямым построением, оно имеет несколько важных моментов, позволяющих проникнуть в суть полимерного заводнения.

1. Время прорыва нефтяного вала (величина, обратная удельной скорости нефтяного вала $v_{\Delta C_2}$) возрастает с увеличением S_{1l} , что свидетельствует о том, что полимерные заводнения будут более экономичными, если их начинать при низкой начальной водонасыщенности. Несомненно, чем меньше S_{1l} , тем выше насыщенность подвижной нефтью, что также является благоприятным фактором для полимерных заводнений.
2. Адсорбция (большие значения D_4) вызывает отставание на всех фронтах. D_4 может быть большим, если пористость низкая, удерживание большое или концентрация закачанного полимера C_{4J} низкая. Обычно C_{4J} такая низкая, что D_4 может быть высоким, даже если удерживание умеренное.
3. Недоступный поровый объем вызывает ускорение всех фронтов, совершенно противоположно удерживанию. Фактически удерживание и недоступный поровый объем можно убрать с тем, чтобы фронт полимера и фронт десорбированной воды v_r (Рис.8-10) перемещались с одинаковой скоростью.
4. Обе величины, как D_4 , так и недоступный поровый объем, влияют на насыщенность нефтяного вала, которая в свою очередь влияет на подвижность нефтяного вала и желаемую концентрацию закачиваемого полимера.

8-5 Элементы разработки полимерного заводнения

Разработка полимерного заводнения – это сложный вопрос. Но большей частью эта сложность возникает из конкретной разработки отдельных аспектов пласта. В этом разделе мы рассмотрим общие моменты, применимые ко всем типам полимерного заводнения.

Методика разработки полимерного заводнения состоит из шести этапов, перечисленных ниже.

1. Отбор пластов – кандидатов для заводнения. Большое значение имеет различие между технической и экономической осуществимостью проекта. Техническая осуществимость означает, что данный пласт подходит для полимерного заводнения, независимо от имеющихся средств. Экономическая осуществимость подразумевает, что проект имеет хорошие шансы быть прибыльным. Техническая осуществимость определяется рядом двойных параметров отбора (см. документацию Национального нефтяного совета, США, 1984). Но для полимерного заводнения руководствоваться следует только двумя параметрами: температура пласта должна быть меньше 350 К во избежание деструкции, и проницаемость пласта должна быть больше $0.02 \mu\text{m}^2$ во избежание закупорки. Экономическая осуществимость определяется простыми расчетами вручную (как в случае метода определения движения отдельных фаз в многофазовом потоке) или с помощью прогнозирующих моделей (Джоунс и др., 1984), применение которых требует решения относительно того, каким образом будет использоваться полимер.
2. Выбор правильного способа. Это – (а) регулирование подвижностей (уменьшение M), (б) регулирование профиля (улучшение профиля проницаемости в нагнетательных или добывающих скважинах) или (с) комбинирование двух

вышеупомянутых способов. Мы не рассматривали вопрос регулирования профиля, но концепции и цели аналогичны случаю полимерного заводнения. Мы хотим закачать агент, который изменит проницаемость для того, чтобы больше жидкости поступало в плотную породу, чем в породу с высокой проницаемостью. Мы можем добиться этого, используя гели, полимеры и твердые вещества за счет применения избирательного перфорирования. Когда избирательное перфорирование неэффективно или не полностью эффективно, мы применяем химические реагенты или твердые вещества.

3. Выбор типа полимера. Требования, предъявляемые к полимерам, используемым в процессах повышения нефтеотдачи, весьма жесткие. Основные из них перечислены ниже:

(а) Хорошая загущающая способность. Это означает большое уменьшение подвижности на себестоимость единицы продукции.

(б) Высокая растворимость в воде. Полимеры должны иметь хорошую растворимость в воде при различных температурах, составах электролита и в присутствии стабилизирующих агентов.

(в) Низкая степень удерживания. Все полимеры адсорбируются на породу пласта в той или иной степени. Кроме того, удерживание может быть обусловлено закупоркой, улавливанием, фазовым разделением или другими механизмами. Под низкой степенью удерживания подразумевается удерживание менее 20 мкг/г.

(г) Сдвиговая стойкость. При течении через проницаемую среду молекулы полимера испытывают напряжение. Как мы уже обсуждали, если напряжение чрезмерное, может произойти механический разрыв или постоянное разрушение молекул, что приводит к потере вязкости. Сдвиговой деструкции особенно подвержен частично гидролизованный полиакриламид.

(д) Химическая стойкость. Полимеры подобно другим молекулам, могут вступать в химические реакции, особенно при высокой температуре и в присутствии кислорода. Для предотвращения этого применяются антиоксиданты.

(е) Биологическая стойкость. Как частично гидролизованные полиакриламиды, так и полисахариды, могут разрушаться под действием бактерий, но последние более восприимчивы. Для предотвращения этого рекомендуется применять биоциды.

(ж) Хороший перенос в проницаемой среде. Это понятие включает в себя по существу способность распространять полимер в неповрежденной породе без чрезмерного перепада давления или закупорки. Хороший перенос, кроме того, означает хорошую фильтруемость и отсутствие проблем с микрогелями, осадками и другими обломками.

Очевидно, что ни один полимер не может универсально соответствовать этим требованиям для всех коллекторских пород. Поэтому мы должны в какой-то степени подогнать полимер к породе. Можно разработать некоторые минимальные общие нормы, но окончательным критерием должна быть экономика.

4. Оценка требуемого количества полимера. Количество (общая масса в килограммах) которое предстоит закачать, равно произведению размера оторочки, порового объема и средней концентрации полимера. Идеальный вариант – определить количество полимера на основании исследования методом оптимизации, в ходе которого определяется % дополнительно добытой нефти в сравнении со стоимостью (%) закачанного полимера. Каждая итерация в методе оптимизации требует определения концентрации полимера в начальной части (пике) оторочки и оценки объема полимерной оторочки (пик, плюс скорость убывания).

(а) Определение концентрации на пике оторочки. Предположим, мы выбрали нужное соотношение подвижностей в результате моделирования (см. Главу 6) или, исходя из ограничений приемистости. Если нужное соотношение подвижностей равно M_T , то

$$M_T = \frac{(\lambda_{rt})_{polymer}}{(\lambda_{rt})_{oil_bank}} = \frac{(\lambda'_{r1} + \lambda_{r2})_{S_1^*}}{(\lambda_{r1} + \lambda_{r2})_{S_{1B}}} \quad (8.5-1)$$

Определение концентраций на пике оторочки означает просто отбор тех закачиваемых концентраций полимера, которые дают правильное M_T в этом уравнении.

Сдвиг в кажущейся вязкости следует из корреляций коэффициента уменьшения проницаемости и данных скорости сдвига, как показано на Рис.8-4. Последние должны оцениваться при скорости сдвига, соответствующей средней скорости в заводнении – обычно это пологий участок кривой низких скоростей сдвига. Оценка знаменателя уравнения (8.5-1), представляющего собой относительную подвижность нефтяного вала, несколько более трудная.

Один способ заключается в том, что насыщенность нефтяного вала определяется графическим методом, описанным в Разделе 8-4, и затем подвижность нефтяного вала определяется из кривых относительных проницаемостей, определенных при этой насыщенности

$$(\lambda_{ке})_{OB} = \left(\frac{k_{r1}}{\mu_1} + \frac{k_{r2}}{\mu_2} \right) \Big|_{S_{1B}} \quad (8.5-2)$$

Этот способ является итеративным, поскольку S_{1B} зависит от кривой движения фазы полимер – нефть. Она, в свою очередь, зависит от кажущейся вязкости полимера, величину которой мы определяем в уравнении (8.5-1). К счастью, зависимость между S_{1B} и кажущейся вязкостью слабая, и сходимость при применении метода проб и ошибок должна быть получена быстро.

Второй способ заключается в том, чтобы принять общую подвижность нефтяного вала за минимум на полной кривой относительных подвижностей (Гогарти и др., 1970). Минимумы на таких кривых, как правило, не соответствуют насыщенности нефтяного вала, определяемой по теории движения отдельных фаз в многофазовом потоке. Однако, M_T , основанное на минимуме, даст безопасный расчет, т.к. соотношение подвижностей при фактической насыщенности нефтяного вала будет всегда меньше или равно M_T . Этот способ имеет свои преимущества, которые заключаются в его простоте, так как он неитеративный.

Оба метода требуют осторожности при определении кривых относительных проницаемостей, т.к. гистерезис может сделать величину k_r при отборе и поглощении разной (Чанг и др., 1978). Такие эффекты гистерезиса особенно трудно воспроизвести, когда начальная водонасыщенность начинается с промежуточного значения. Второй метод, кроме того, используется в разработках мицеллярно-полимерных заводнений (см. Рис.9-34).

(б) Определение объема полимерной оторочки. Один из способов заключается в том, чтобы взять объем оторочки, несколько превышающий количество удерживаемого полимера в пласте. Хотя это основное допущение при расчете мицеллярной оторочки, удерживание не является доминирующим фактором в определении размера полимерной оторочки. Основным фактором, влияющим на выбор размера полимерной оторочки, является образование языков в результате разности вязкостей продавочной воды и полимера.

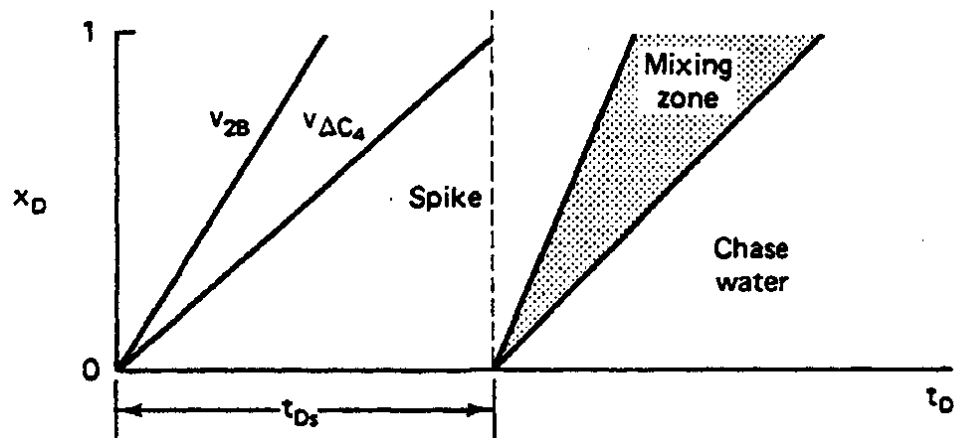
При прогнозировании степени образования языков в результате разности вязкостей, сохраняются все проблемы, существующие при оценке скорости распространения языков, которые мы рассматривали в Разделе 7-8. Мы опять используем модель Ковалья, но здесь мы должны модифицировать эффективное соотношение подвижностей, чтобы учесть полиномиальное смешивание, выраженное в уравнении (8.2-1).

$$E = (1 + a_1 \cdot C_4 + a_2 \cdot C_4^2 + a_3 \cdot C_4^3 + \dots) R_{RF} = \frac{K_{val}}{H_K} \quad (8.5-3)$$

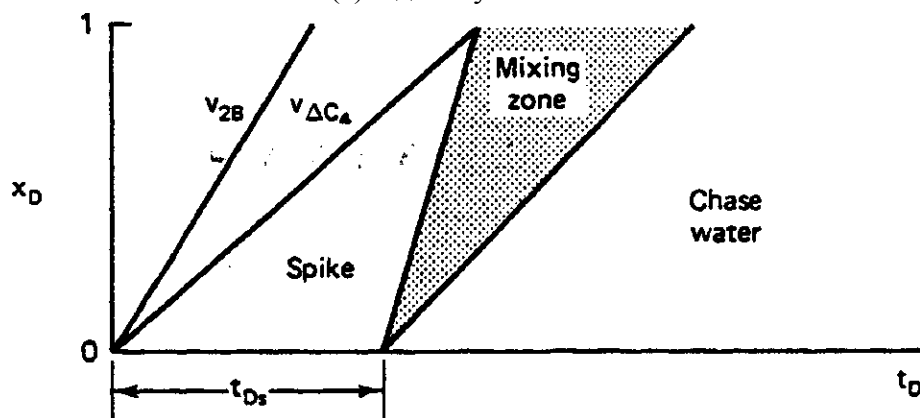
где $C_4 = 0.22 C_{4J}$. Употребление этого уравнения, в частности постоянного коэффициента смешивания 0.22, в общем-то не опробовано в области полимерного заводнения. В этом

отношении мы предположили полную аналогию между случаем смешивающегося при первом контакте заводнения и неустановившемся вытеснении продавочной водой.

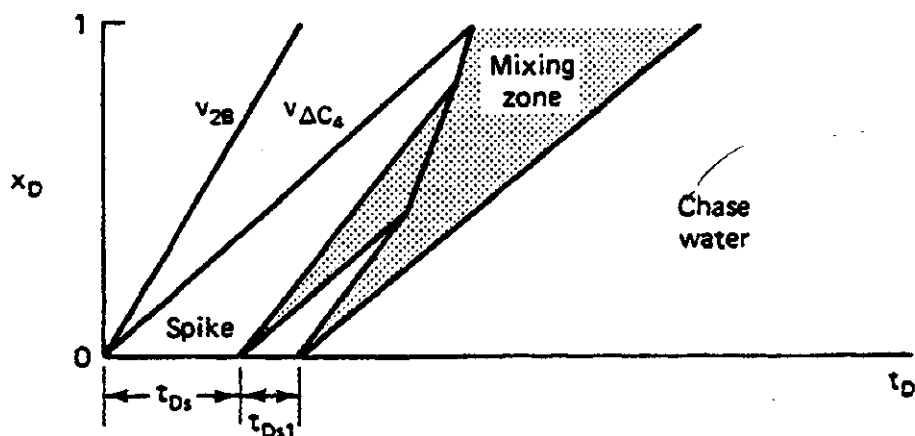
Мы используем диаграмму время – расстояние, чтобы сделать набросок вариантов выбора размера оторочки. Наглядный метод определения размера оторочки – начать закачку воды в момент прорыва полимера (Рис.8-12а). Этот метод чрезмерно консервативный, так как добывается большое количество полимера с исходными характеристиками. Второй возможностью является подбор размера полимерной оторочки с таким расчетом, чтобы полимер и продавочная вода прорывались одновременно (Рис. 8-12b), что дает следующее уравнение для размера оторочки



(a) Одноступенчатое



(b) Одноступенчатое



(c) Двухступенчатое

Рис. 8-12 Диаграмма время-расстояние для подбора размера полимерной оторочки

$$t_{D_s} = 1 - S_{2r} - D_4 - \frac{1 - S_{2r}}{K_{val}} \quad (8.5-4)$$

где мы приняли $S_1^* = 1 - S_{2r}$ и $\phi_{IPV} = 0$. В равной степени жизнеспособной альтернативой является постепенное уменьшение размера полимерной оторочки до воды. На Рис. 8-12(с) показаны два таких этапа, один показывает размер оторочки на пике, и промежуточный этап – размер оторочки подобран с таким расчетом, чтобы вода прорвалась вместе с полимером. Линии изоконцентрации становятся изогнутыми после интерференции волн.

В случае, представленном на Рис. 8-12(с) используется меньше полимера, чем в случае на Рис. 8-12(б). Фактически, Кларидж (1978) показал, что при вытеснении с непрерывно меняющимся количеством полимера, используется наименьшее количество полимера. Такой подбор размера является непрактичным, за исключением предельного случая, в сравнении со случаем, в котором подбор не осуществляется (Рис. 8-12(б)). А с последовательностью ограниченных этапов постепенного изменения чрезвычайно трудно иметь дело теоретически из-за присутствия многочисленных степеней свободы. Т.е. инженер должен выбрать N число этапов, N число объемов оторочки и N-1 число промежуточных концентраций. На практике одноступенчатые (без постепенного изменения) полимерные заводнения и логарифмическое постепенное изменение (Манган, 1968) являются наиболее распространенными методами.

5. Разработка оборудования для закачки полимера. Получение раствора хорошего качества, несомненно, имеет большое значение, но стоимость оборудования для закачки обычно невелика по сравнению со стоимостью скважины и химреагентов. Тремя важными компонентами являются оборудование для смешивания, фильтрации и закачки. Тип оборудования для смешивания зависит от полимера. Для твердых полимеров требуется прочный смеситель, смонтированный на полозьях. Концентраты или эмульсионные полимеры требуют чего-то менее сложного, хотя для последних может потребоваться разрушение эмульсии. Фильтрация зависит главным образом от успеха смешивания, но, как правило, это не сложнее, чем в случае обычного заводнения. Но если потребуются необычная и сложная фильтрация, сложность и стоимость процесса могут стать существенными. Оборудование, применяемое для закачки, то же, что и в случае обычного заводнения. Все наземное и скважинное оборудование должно быть модифицировано с тем, чтобы избежать деструкции любого вида.
6. Пластовые условия. Здесь мало, что требуется сверх соображений, имеющих место при обычном заводнении, а именно: оптимальная сетка размещения скважин и площадь дренирования, приходящаяся на скважину, стратегия заканчивания скважин, распределение (баланс) скважин, характеристика коллектора и допустимые скорости закачки.

Оптимальные значения этих параметров предполагают точную оценку, что даст максимальную норму прибыли на вложенный капитал. Т.к. задействовано несколько величин, обычно невозможно произвести оптимизацию по каждой из них. Но для наиболее чувствительных величин оптимизация требуется.

На Рис.8-13 схематически представлена оптимизация количества закачиваемого полимера. Вертикальные оси представляют как экономический критерий, а именно совокупные дополнительные будущие поступления наличными, приведенные в оценке настоящего времени, так и дополнительную нефтеотдачу в зависимости от количества закачанного полимера. Кривая дополнительной нефтеотдачи монотонно возрастает от нуля. Кривая будущих поступлений наличными в оценке настоящего

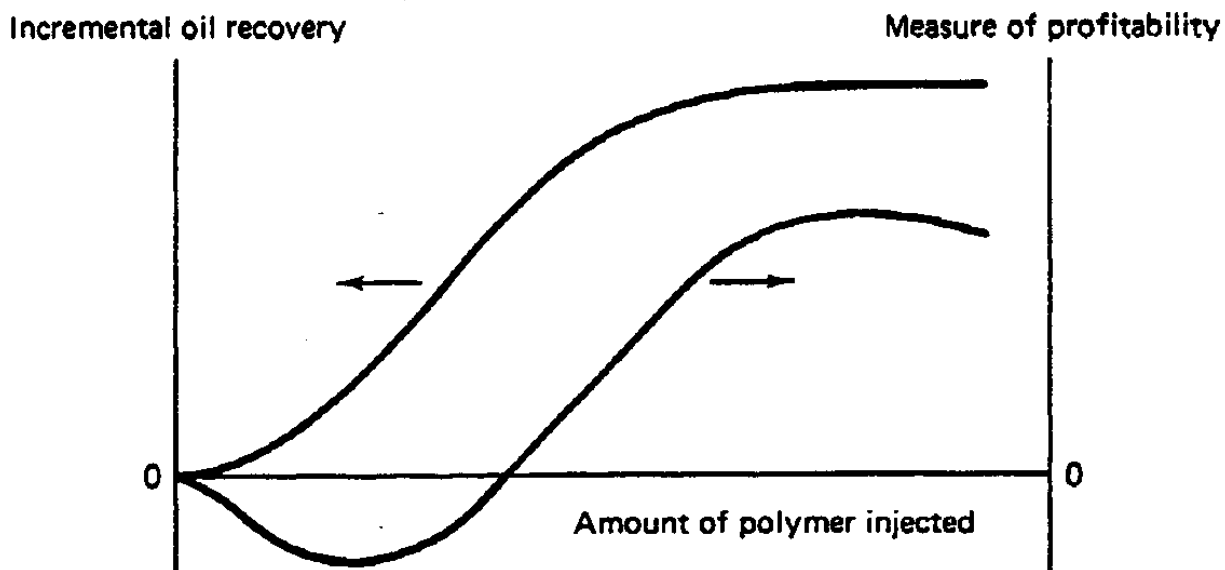


Рис.8-13 Схематическое изображение дополнительно добытой нефти и тенденция развития экономики для заводнения с регулируемой подвижностью

времени начинается с нуля, убывает при небольших количествах полимера, и затем возрастает до максимума при значительно больших количествах. После этой точки кривая будущих поступлений наличными, приведенных в оценке настоящего времени, монотонно убывает. Кривая будущих поступлений первоначально убывает, потому что все расходы на полимер определяются на начальных этапах проекта, когда добыча дополнительной нефти незначительна. Этот предварительный эффект присутствует во всех процессах повышения нефтеотдачи, особенно в химических заводнениях. Эта кривая очень полезна, т.к. она противостоит тенденции сокращать количество закачиваемого полимера, если первоначальные экономические показатели неблагоприятны. К сожалению, во многих полимерных заводнениях используемое количество полимера было меньше оптимального.

8-6 Промысловые результаты

Дополнительная нефтеотдача, получаемая в результате полимерного заводнения, это разница между суммарной фактически добытой нефтью и нефтью, которая была бы добыта за счет непрекращающегося обычного заводнения (см. Пример 8L). Поэтому для технического анализа проекта важно установить снижение нефтеотдачи в полимерном заводнении и точную скорость падения пластового давления при обычном заводнении. На Рис.8-14 показана дополнительная нефтеотдача в полимерном заводнении на месторождении North Burbank.

В Таблице 8-2 собраны промысловые результаты более 250 полимерных заводнений из обзора, сделанного Маннингом и др. (1983). В Таблице приведены данные по нефтеотдаче и параметрам отбора, применявшимся для полимерного заводнения. Примерно треть из упомянутых проектов – это промышленные или полномасштабные промысловые заводнения. Статистика нефтеотдачи, представленная в Таблице 8-2, показывает, что средняя нефтеотдача в полимерном заводнении составляет 3.56% от оставшегося (после обычного заводнения) количества нефти в пласте, и составляет почти 1 м³ дополнительной нефтеотдачи на каждый кг закачанного полимера при больших колебаниях того и другого значения. Большая изменчивость отражает характер

полимерных заводнений предыдущих десятилетий. Учитывая среднюю потребность в полимере и среднюю стоимость нефти и полимера, кажется, полимерное

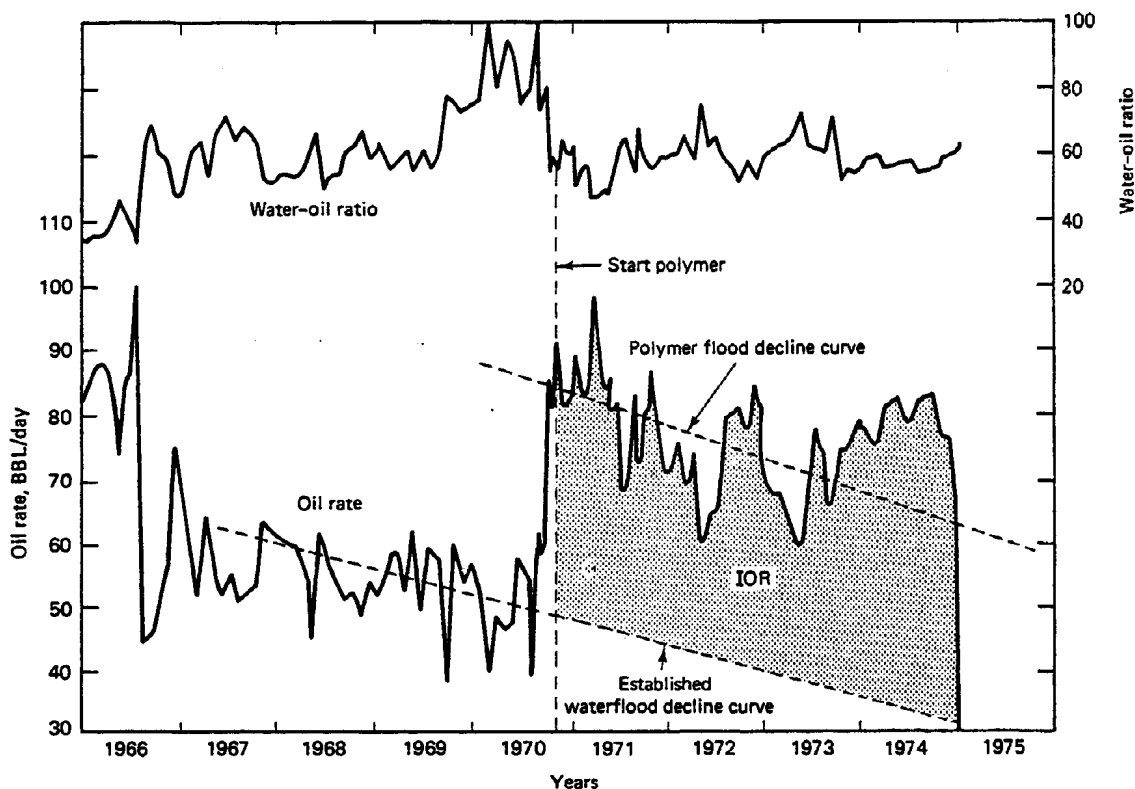


Рис.8-14 Отдача в третичном полимерном заводнении, проводившемся на месторождении North Burbank Unit, штат Оклахома (Клампитт и Рейд, 1975)

заводнение должно быть весьма привлекательным процессом повышения нефтеотдачи. Однако расходы всегда должны сравниваться на основе дисконтирования, с учетом разницы курса валют во времени. Такое сравнение уменьшит кажущуюся привлекательность полимерного заводнения из-за пониженной фильтруемости полимерных растворов.

8-7 Заключительные замечания

По числу промысловых проектов полимерное заводнение является наиболее распространенным существующим методом повышения нефтеотдачи. Причина этого заключается в том, что, за исключением обычного заводнения, полимерное заводнение является самым простым методом для применения в промысловых условиях и требует относительно небольших капиталовложений. Большинство промысловых проектов были небольшими, так же как и количество добытой нефти – результат, которого нужно было ожидать, исходя из трактовки, приведенной в этой главе. Тем не менее, может существовать значительный потенциал для приемлемой нормы прибыли даже в случае низкой нефтеотдачи.

Наиболее важным свойством, освещенным в этой главе, является неньютоновское поведение полимерных растворов, т.к. такое поведение влияет на потребность в полимере, рассчитать которое можно, рассчитав соотношение подвижностей, и на способность точно прогнозировать скорость закачки полимера.

Таблица 8-2 Статистика полимерного заводнения (по данным Маннинга, 1982)

Стандартный показатель (единицы измерения)	Количество проектов*	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Стандартное отклонение
Нефтеотдача (% оставшейся нефти в пласте)	50	3.56	0	25.3	5.63
Использование полимера (м ³ /кг полимера)	80	0.94	0	12.81	1.71
Нефтеотдача (м ³ /гм ³ объема насыпного материала)	88	3.1	0	24.3	4.72
Изменение проницаемости (в долях единиц)	118	0.70	0.06	0.96	0.19
Насыщенность подвижной нефтью (в долях единиц)	62	0.27	0.03	0.51	0.12
Вязкость нефти (мПа·с)	153	36	0.072	1 491	110.2
Минерализация пластовой воды (кг/м ³ общего кол-ва растворенных в воде твердых веществ)	10	40.4	5.0	133.0	33.4
Отношение подвижности воды к подвижности нефти (безразмерное)	87	5.86	0.1	51.8	11.05
Средняя концентрация полимера (г/м ³)	93	339	51	3 700	343
Температура (К)	172	319	281	386	302
Средняя проницаемость (μм ²)	187	0.349	0.0015	7 400	0.720
Средняя пористость (доля единиц)	193	0.20	0.07	0.38	0.20

* По большинству проектов имеются неполные данные, включая как промышленные, так и опытные проекты.

Скорость закачки полимера определяет продолжительность проекта, которая в свою очередь определяет экономическую норму прибыли. Расчет приемистости, наряду с оценками насыщенности подвижной нефтью и вероятности того, что полимер останется стойким в данном применении, являются наиболее важными определяющими факторами успеха полимерного заводнения.

ПРИМЕРЫ

8А. *Расчет скоростей сдвига.* Рассчитайте эквивалентную скорость сдвига при нижеследующих условиях:

(а) При скважине с не обсаженным забоем (вся скважина открыта для течения), где $q = 16 \text{ м}^3 / \text{сут}$, $R_w = 7.6 \text{ см}$, а эффективная мощность залежи $H_i = 15.25 \text{ м}$.

(б) В промысловых условиях, где промежуточная скорость равна 1.77 μм/сек .

(с) Используя данные для полимера Xanflood при температуре 297 К и 1% NaCl (Рис.8-5), оцените эффективную вязкость в проницаемой среде при вышеупомянутых условиях для полимерного раствора концентрацией 600 г/м^3 .

(d) Предположим, что скважина, упомянутая в пункте (а), перфорирована 1 см отверстиями (внутренний диаметр) по всей эффективной мощности залежи; плотность перфорации составляет 4 отверстия / метр. При условии равномерного распределения жидкости определите скорость сдвига в перфорациях.

(е) Сравнив результаты пунктов (а) и (d), какой вывод вы сделаете о предпочтительном методе заканчивания скважин при полимерном заводнении? Во всех пунктах используйте $k_1 = 0.1 \mu\text{м}^2$, $\phi = 0.2$, и $S_1 = 1.0$.

8В. Вывод степенного закона в проницаемой среде. Уравнение (8.2-9) может быть выведено таким же образом, как и уравнение (3.1-11). Методика следующая:

(а) Покажите, что баланс сил на кольцеобразном элементе однофазной жидкости, текущей в через трубку (как на Рис.3.1), в условиях установившегося ламинарного потока равен

$$\frac{1}{r} \frac{d(r \cdot \tau_{rz})}{dr} = \frac{\Delta P}{L} \quad (8B-1)$$

где τ_{rz} - это касательное напряжение на цилиндрической поверхности в r , а $\Delta P/L$ - перепад давления. В интегрированном виде это уравнение дает

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta P}{2 \cdot L} \cdot r \quad (8B-2)$$

Касательное напряжение должно быть конечным при $r = 0$.

(b) Выражение степенного закона, связывающего касательное напряжение со скоростью сдвига, представляет собой

$$\tau_{rz} = K_{pl} \cdot \dot{\gamma}^{n_{pl}-1} \quad (8B-3)$$

где

$$\dot{\gamma} = -\frac{dv}{dr} \quad (8B-4)$$

является скоростью сдвига. Покажите, что комбинация уравнений (8B-2) – (8B-4) дает дифференциальное уравнение, которое имеет следующее решение:

$$v(r) = \left(\frac{\Delta P}{2 \cdot L \cdot K_{pl}} \right)^{1/n_{pl}} \cdot \left(\frac{n_{pl}}{1+n_{pl}} \right) \cdot \left(R^{\frac{1+n_{pl}}{n_{pl}}} - r^{\frac{1+n_{pl}}{n_{pl}}} \right) \quad (8B-5)$$

В этом уравнении использовалось условие отсутствия скольжения $v(R) = 0$.

(с) Используя уравнение (8B-5), покажите, что скорость сдвига у стенки трубки зависит от средней скорости как:

$$\dot{\gamma}_{wall} = \frac{1+3 \cdot n_{pl}}{n_{pl}} \cdot \left(\frac{\bar{v}}{R} \right) \quad (8B-6)$$

(d) При подстановке эквивалентного радиуса из уравнения (3.1-4) получаем:

$$\dot{\gamma}_{wall} = \frac{1+3 \cdot n_{pl}}{n_{pl}} \cdot \frac{u}{(8 \cdot k_1 \cdot \phi_1)^{1/2}} \quad (8B-7)$$

При соответствующей идентификации переменных это уравнение дает уравнения (8.2-7) и (8.2-8) при подстановке в

$$\mu_{app} = \frac{\tau_{rz}}{\dot{\gamma}_{eq}} \quad (8B-8)$$

8C. Лэнгмюровские расчеты. Изотерму Лэнгмюра и другие моменты, позволяющие разобраться в сути вопроса, можно вывести довольно просто. Предположим, что проницаемая среда, контактирующая с раствором, содержащим адсорбирующиеся вещества, состоит из постоянного количества мест поверхности. Часть θ из этих мест покрывается, когда концентрация раствора адсорбирующихся веществ равна C .

(a) Пусть скорость адсорбции будет $k_f C(1-\theta)$, а скорость десорбции - $k_r \theta$. k_f и k_r являются константами направленной вперед и назад скорости. В условиях равновесия скорости прямой и обратной реакции равны. Покажите, что частичный охват поверхности равен

$$\theta = \frac{\frac{k_f}{k_r} \cdot C}{1 + \frac{k_f}{k_r} \cdot C} \quad (8C-1)$$

(b) Покажите, что θ может быть связано с ω_s - адсорбцией, выраженной в массе на единицу массы породы - нижеприведенной зависимостью

$$\theta = \frac{d_p^2 \cdot N_A \cdot \rho_r}{a_v \cdot M_w} \cdot \omega_s \quad (8C-2)$$

где ρ_r - плотность адсорбированного вещества, a_v - удельная площадь поверхности среды, M_w - молекулярная масса адсорбированного вещества, а N_A - число Авогадро. Предположим, что адсорбированное вещество существует на поверхности в виде монослоя, состоящего из кубиков диаметром d_p .

(c) Рассчитайте θ , если адсорбция полимера составляет 18 $\mu\text{г}/\text{г}$ породы. Возьмите среднее значение, чтобы получить свойства песчаника Береа, представленные в Таблице 3-5. Вы должны вывести эффективный диаметр полимерной сферы, исходя из характеристической вязкости (уравнение 8.2-4) и данных, представленных на Рис.8-4. Молекулярная масса полимера равна 2 миллионам.

(d) Какой вывод о характере адсорбции полимера вы можете сделать на основании этого?

8D. Сложности в связи с изотермой Лэнгмюра

(a) Предположим, что адсорбция одного адсорбирующегося вещества, протекающая по изотерме Лэнгмюра, при конечной скорости массопередачи, r_{mi} , между основной массой раствора и поверхностью раздела твердого вещества и жидкости, дана как

$$r_{mi} = h \cdot (C - \bar{C}) \quad (8D-1)$$

В этом выражении C и \bar{C} - концентрации в основной массе и на поверхности раздела, а h - коэффициент удельного переноса массы. Покажите, что изотерма, связывающая θ с C , имеет ту же форму, что и уравнение (8C-1), но с заменой k_f на k'_f , где

$$\frac{1}{k'} = \frac{1}{k_f} + \frac{1}{h} \quad (8D-2)$$

Вы должны принять, что скорость адсорбции равна r_{mi} .

(b) Покажите, что если $h \rightarrow \infty$, изотерма стремится к выражению, выведенному в Примере 8C.

(c) Теперь рассмотрите случай, когда $h \rightarrow \infty$ и существует $i = 1, \dots, N_c$ адсорбирующихся веществ, каждое из которых конкурирует за определенное количество мест. Выведите

изотерму Лэнгмюра, связывающую концентрацию адсорбированного вещества i , θ_i , с его концентрацией в основной массе раствора.

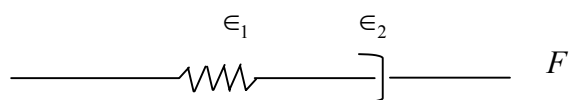
(d) Используйте это выражение для подтверждения частичных охватов, рассчитанных в части (d) Примера 8С.

8E. *Упрощенное уменьшение проницаемости.* Одно из объяснений уменьшения проницаемости заключается в том, что эффективный размер поры уменьшается (или эффективный диаметр зерна увеличивается) из-за адсорбции слоя полимера на поверхность породы. В дальнейшем за диаметр сферы D_p возьмите среднее значение:

(a) Выведите выражение для коэффициента уменьшения проницаемости R_k , исходя из того, что полимер адсорбируется на поверхность породы в виде равномерного слоя толщиной δ . Вы должны использовать концепцию гидравлического радиуса, изложенную в Разделе 3-1.

(b) Постройте два графика зависимости адсорбции полимера (мг полимера на г породы) от R_k при $\phi = 0.1$ и 0.2 . Примите плотность адсорбированного полимера равной 1.5 г/см^3 и плотность породы – 2.5 г/см^3 .

8F. *Отображение линейной вязкоупругости.* Мощной концептуальной моделью жидкости, которая обладает некоторыми упругими свойствами, является модель Максвелла, представляющая собой последовательную комбинацию пружины и амортизатора



где F - сила, поддерживаемая моделью, а ϵ_1 и ϵ_2 – напряжения (безразмерные деформации). Пусть пружина будет упругим линейным элементом, так чтобы

$$F = k \cdot \epsilon_1 \quad (8F-1)$$

аналогичным образом амортизатор будет вязким ньютоновским элементом

$$F = \mu \cdot \dot{\epsilon}_2 \quad (8F-2)$$

где k и μ - жесткость пружины и вязкость элемента. Из-за последовательного расположения сила, поддерживаемая обоими элементами, одинакова; однако, общее напряжение ϵ составляет:

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (8F-3)$$

(a) Покажите, что зависимость между временной характеристикой силы и напряжения равна

$$\mu \cdot \dot{\epsilon} = \theta \cdot \dot{F} + F \quad (8F-4)$$

В этом уравнении $\theta = \mu / k$ - это время релаксации модели, а $\dot{\epsilon}$ – производная ϵ по времени.

(b) Чтобы проинтегрировать это, мы рассматриваем $\dot{\epsilon}$ как известную функцию времени. Покажите, что общее решение представляет собой следующее

$$F(t) = e^{-t/\theta} \cdot F(0) + k e^{-t/\theta} \cdot \int_0^t e^{\xi/\theta} \frac{d\epsilon}{d\xi} d\xi \quad (8F-5)$$

Следующие три этапа завершают аналогию между моделью Максвелла и вязкоупругим потоком.

(c) Если скорость деформации постоянная, а начальная сила модели равна нулю, покажите, что

$$F(t) = \mu \cdot \dot{\epsilon} \cdot (1 - e^{-t/\theta}) \quad (8F-6)$$

(d) Кажущаяся вязкость модели определяется как $F / \dot{\epsilon}$. Покажите, исходя из уравнения (8F-4), что это принимает вид

$$\mu_{app} = \frac{\mu}{1 + \theta \cdot \frac{\dot{F}}{F}} \quad (8F-7)$$

(e) Используйте это уравнение и уравнение (8F-6), чтобы показать, что

$$\mu_{app} = \frac{\mu}{1 + N_{Deb}} \quad (8F-8)$$

Величина знаменателя уравнения (8F-8) – это число Деборы

$$N_{Deb} = \frac{\theta}{t} \quad (8F-9)$$

Это число – отношение времени релаксации ко времени невозмущенного потока вокруг зерна породы – является критерием вязкоупругих эффектов при течении в проницаемой среде, когда характеристическое время течения t заменено на $\phi D_p / u$.

8G. Анализ устройства для определения скрин-фактора. Устройство для измерения скрин-фактора, представленное на Рис.8-8, можно рассматривать как проницаемую среду с гравитационным режимом. Исходя из геометрии колбы, объем жидкости в колбе, V , при любой высоте $h(h_1 > h > h_2)$ равен

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot (h - h_2)^2 \cdot (3R - h + h_2) \quad (8G-1)$$

Если мы рассматриваем пакет сит как проницаемый резистивный элемент, поток через сита равен

$$u = - \left(\frac{k \cdot \rho \cdot g \cdot h}{L \cdot \mu_{app}} \right) \quad (8G-2)$$

(a) Т.к. $u = -\pi r^2 (dV / dt)$, покажите, исходя из этих уравнений, что высота h является решением для

$$\frac{dh}{dt} [(h - h_2) \cdot (2R - (h - h_2))] = \frac{r^2 \cdot \rho \cdot g \cdot k \cdot h}{\mu_{app} \cdot L} \quad (8G-3)$$

L в этих уравнениях – это высота пакета сит.

(b) Опуская время истечения из трубок выше и ниже нижней колбы, выведите выражение для времени истечения ньютоновской жидкости. Время истечения t_d определяется как

$$t_d = t|_{h=h_2} - t|_{h=h_1} \quad (8G-4)$$

(c) Повторите часть (b), используя вязкоупругую жидкость, кажущаяся вязкость которой равна

$$\mu_{app} = \frac{H_{VE}}{1 + b \cdot u} \quad (8G-5)$$

Принимая во внимание уравнения (8G-4) и (8.2-14), покажите, что скрин-фактор SF дается как

$$SF = \frac{H_{VE}}{\mu_1} + \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu_1 \cdot L} \cdot b \cdot I \quad (8G-6)$$

где I - геометрический фактор. Из Примера 8F следует, что скрин-фактор прямо пропорционален времени релаксации жидкости.

8H. Расчет приемистости.

Используя данные для песка Coalinga НХ (Тинкер и др., 1976), приведенные ниже:

$$\begin{aligned} \phi &= 0.28 & k_1 &= 0.036 \mu\text{м}^2 \\ K_{pl} &= 7.5 \text{МПа} - c(c)^{n_{pl}-1} & \mu_1 &= 0.64 \text{МПа} - c \\ n_{pl} &= 0.8 & H_t &= 2.44 \text{м} \\ R_k &= 3 & R_w &= 10 \text{см} \\ R_e &= 284 \text{м} & i &= 30 \text{м}^2 / \text{сут} \\ & & S_{2r} &= 0.2 \end{aligned}$$

(а) Рассчитайте относительную приемистость I_r в зависимости от суммарной закачки полимера. Постройте на миллиметровой бумаге график зависимости I_r от t_D (вплоть до $t_D = 0.5$).

(б) Покажите, что когда $R_p = R_e$, случай ньютоновского полимера ($n_{pl} = 1$) преобразуется до вида

$$I_r = \frac{\mu_1}{K_{pl} \cdot R_k} \quad (8H-1)$$

(с) Постройте график зависимости для случая ньютоновского полимера, для песка НХ на том же графике (пункт (а)).

8I. Уточнение расчетов приемистости. Если диапазон скоростей сдвига в цилиндрическом сосуде выходит за пределы диапазона действия степенного закона, следует использовать усеченную форму уравнения (8.2-1), приведенную ниже:

$$\mu_{app} = \begin{cases} \mu_1^0, & u < u_0 \\ H_{pl} \cdot u^{n_{pl}-1}, & u_0 < u < u_\infty \\ \mu_1^\infty, & u > u_\infty \end{cases} \quad (8I-1)$$

где u_0 и u_∞ - приведенные скорости, которые определяют пределы диапазона действия степенного закона.

(а) Повторите вывод, приведенный в Разделе 8-3, для I и I_r , используя уравнение (8I-1), при условии, что обе скорости, как максимальная, так и минимальная, выходят за пределы диапазона действия степенного закона.

(б) При численном моделировании может оказаться удобнее определять приемистость в единицах среднего пластового объема \bar{P} , а не P_e (Бондор и др., 1972) Повторно выведите выражение для I , определенного таким образом.

(с) При больших численных моделированиях весь диапазон неньютоновского поведения полимера ограничен одним блоком сетки скважины. Это случай, когда неньютоновский эффект может быть эффективно выражен в единицах средней “насыщенности” полимером как скрин-фактор, изменяющийся во времени. Выведите выражение для этого скрин-фактора.

8J. Перенос адсорбирующихся оторочек. Передний край полимерной оторочки, адсорбирующейся по изотерме Лэнгмюра, является самоаостряющимся.

(а) Покажите, что задний край оторочки ($C_K < C_J$) представляет собой распространяющуюся волну.

(b) Если параметры Лэнгмюра в уравнении (8.2-10) – это $a = 2$ и $b = 20$, постройте диаграмму зависимости расстояния от времени и изменения характеристик выходящего потока во времени в процессе вытеснения оторочкой $t_{D_s} = 0.4$. Примите $C_I = C_K = 0$ и $C_J = 1$.

(c) Распространение оторочек удовлетворяет условиям общего материального баланса

$$t_{D_s} = \frac{\int_0^{\infty} (C + C_s) dx_D}{C_J} \quad (8J-1)$$

Используйте аналогию с интеграцией Уэлджа, приведенную в Разделе 5-2, чтобы показать, что уравнения (8.4-1) и (8.4-2) также удовлетворяют условиям материального баланса. Во всех этих расчетах, примите поток однофазным с обычными допущениями движения отдельных фаз в многофазовом потоке.

8K. Длина асимптотической зоны смешивания (Лэйк и Хелфферих, 1978). Стабилизированные зоны смешивания встречаются в смешивающихся вытеснениях, если переносимое вещество адсорбируется согласно изотерме Лэнгмюра. Распространение, вызываемое дисперсией, уравновешивается заострением, вызываемым адсорбцией. В последующем примите безразмерный материальный баланс адсорбирующегося вещества равным

$$\frac{\partial(C + C_s)}{\partial t_D} - \frac{\partial C}{\partial x_D} - \frac{1}{N_{Pe}} \frac{\partial^2 C}{\partial x_D^2} = 0 \quad (8K-1)$$

где C и C_s - концентрации адсорбирующегося вещества в растворе и в адсорбированном виде. C нормализуется таким образом, что закачиваемая концентрация равна единице, $C_I = 1$, $C_I = 0$.

(a) Покажите, что уравнение (8K-1) может быть преобразовано в систему текущих координат (x'_D, t_D) , где $x'_D = x_D - v_{\Delta C} t_D$, а $v_{\Delta C}$ - скорость импульса C . Это дает

$$\frac{\partial(C + C_s)}{\partial t_D} - v_{\Delta C} \frac{\partial C_s}{\partial x'_D} + (1 - v_{\Delta C}) \cdot \frac{\partial C}{\partial x'_D} - \frac{1}{N_{Pe}} \frac{\partial^2 C}{\partial (x'_D)^2} = 0 \quad (8K-2)$$

(b) Вытеснение асимптотически стремится к стабилизированному потоку, производные по времени в уравнении (8K-2) равны нулю. Покажите, что при этом пределе получаемое обыкновенное дифференциальное уравнение может быть проинтегрировано, дав

$$\Delta x_D = \frac{1}{N_{Pe}} \int_{0.9}^{0.1} \frac{dC}{(1 - v_{\Delta C}) \cdot C - v_{\Delta C} \cdot C_s} \quad (8K-3)$$

В уравнении (8K-3) используются граничные условия $C(+\infty) = dC(+\infty)/dx_D = 0$ и определение безразмерной зоны смешивания, приведенное в уравнении (5.2-15a).

(c) Когда $C_J = 1$, удобно записать изотерму Лэнгмюра (уравнение 8.2-10) таким образом, что вместо параметра a в уравнении появляется адсорбция, представленная пологим участком кривой

$$C_s = \frac{(1 + b) \cdot C_{sJ}}{1 + b \cdot C} \quad (8K-4)$$

где C_{sJ} - максимальная концентрация адсорбированного вещества. Подставьте уравнение (8K-4) в уравнение (8K-3), и произведите указанное интегрирование, чтобы показать, что

$$\Delta x_D = \frac{1}{N_{Pe}} \left\{ \frac{1 + C_{sJ}}{C_{sJ}} \right\} \left(1 + \frac{2}{b} \right) \ln(9) \quad (8K-5)$$

где это уравнение использовало форму $v_{\Delta C}$, не противоречащую уравнению (8K-4).

(d) Возьмите уравнение (8K-5) в пределах $b \rightarrow \infty$, $b \rightarrow 0$ и $N_{Pe} \rightarrow \infty$ и объясните каждый ответ с физической точки зрения.

8L. Движение отдельных фаз в многофазовом потоке и дополнительная нефть

(a) Рассчитайте отставание продвижения фронта полимера D_4 , когда максимальная концентрация полимера составляет 1200 г/м^3 , а пористость – 0.2.

(b) Используя значение D_4 , приведенное в части(a), и относительные проницаемости для воды – нефти, представленные на Рис.8L, рассчитайте характер изменения во времени потока полимера и нефти в полимерном заводнении при $\mu_1^0 = 30$ мПа·с. Примите вязкости нефти и воды равными 20 и 1мПа·с, соответственно, угол падения пласта – 0, коэффициент уменьшения проницаемости –1, и начальная водонасыщенность – 0.4.

(с) Правильным, с технической точки зрения, способом оценки полимерного заводнения является определение дополнительной добычи нефти (IOR)

$$IOR = (\text{нефть, добытая за счет полимерного заводнения}) - (\text{нефть, добытая за счет обычного заводнения}) \quad (8L-1)$$

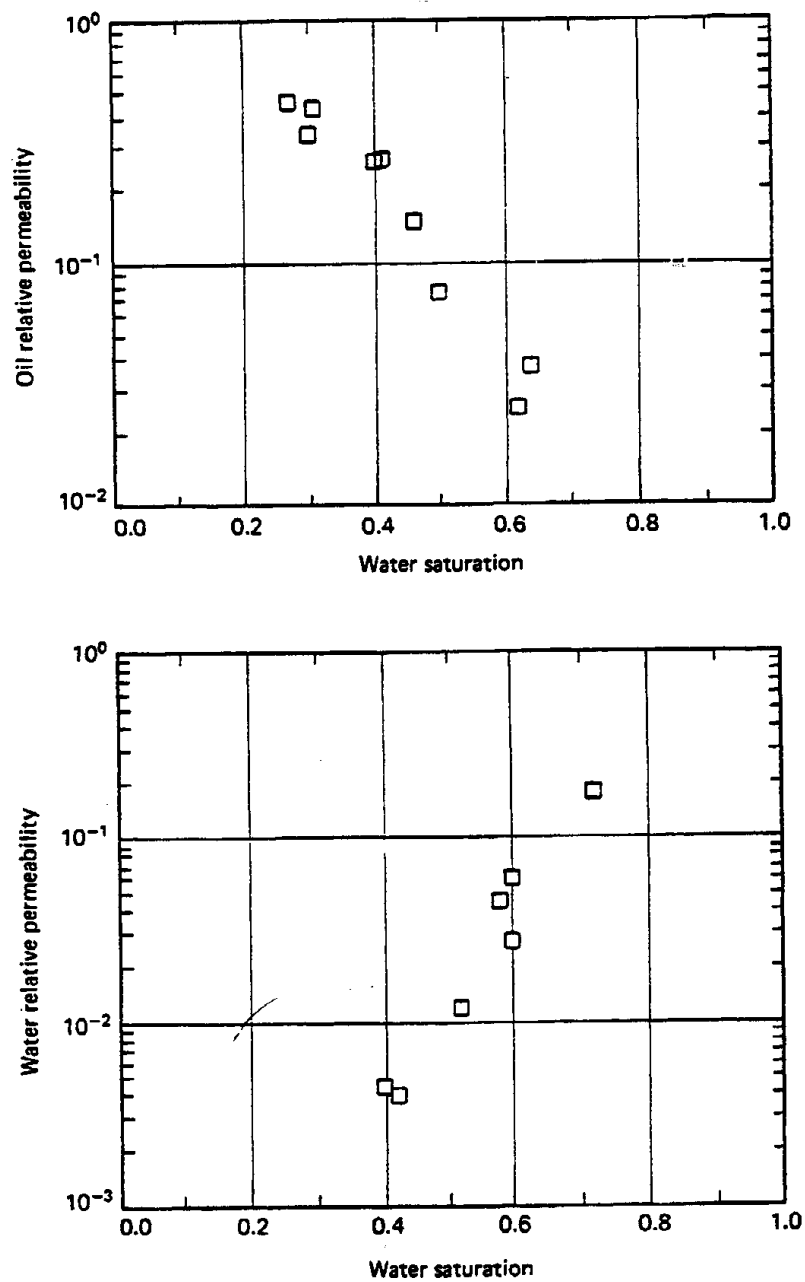


Рис.8L Относительные проницаемости для Примера 8L (Эль Дорадо, 1977).

Рассчитайте и постройте график зависимости дополнительной добычи нефти (в ст. куб. м) от времени. Примите поровый объем равным $1.6 \times 10^6 \text{ м}^3$, постоянную скорость закачки – 480 ст. куб. м / сутки, и все коэффициенты пластового объема – равными $1.0 \text{ м}^3 / \text{сут}$.

8M. *Движение отдельных фаз в многофазовом потоке и оторочки.* Теорию изменения доли фазы в многофазном потоке можно использовать, чтобы разобраться в поведении полимерных оторочек в идеализированных условиях и выявить коэффициент использования полимера.

(а) Предположите, что полимер закачивается в виде оторочки. Если вода, закачиваемая вслед за полимером, вытесняет его (полимер), как в случае идеального смешивающегося вытеснения при остаточной нефтенасыщенности, покажите, что фронт полимер – вода продвигается с удельной скоростью

$$v_{cw} = \frac{1}{1 - S_{2r}} \quad (8M-1)$$

если адсорбция полимера является необратимой, а исключенный поровый объем незначительный.

(b) Покажите, что размер полимерной оторочки, необходимый для удовлетворения условий адсорбции, равен D_4 .

(c) Ниже перечислены данные, которые нужно использовать в оставшейся части этого примера:

$$a = 1 \text{ см}^3 / \text{гр породы}$$

$$C_{4J} = 800 \text{ гр} / \text{м}^3$$

$$b = 100 \text{ см}^3 / \text{мгр}$$

$$\rho_s = 2.65 \text{ гр} / \text{см}^3$$

$$\phi = 0.2$$

Постройте график изменения характера потоков нефти и полимера во времени и в зависимости от расстояния, если размер оторочки составляет половину того, что требуется по условиям адсорбции. Используйте кривые движения отдельных фаз и начальное условие Примера 8L.

8N. *Разработка полимерного заводнения.* Вам надо разработать полимерное заводнение для пласта, содержащего нефть и воду, вязкость которых равна 25 мПа·с и 0.38 мПа·с, соответственно, при пластовой температуре 73°C . Используйте кривые относительных проницаемостей на Рис.8L, и условия означают, что данные для вытеснения нефти ксантаном, представленные на Рис.8-4 и 8-5, подходят для этого пласта.

(а) Постройте полные кривые относительных проницаемостей. Если требуемое соотношение подвижностей равно 0.7, определите концентрацию полимера, необходимую для того, чтобы осуществить это. Используйте данные, приведенные на Рис.8-5 и вспомните, что μ'_1 / μ_1 по существу не зависит от температуры.

(b) Определите параметры степенного закона K_{pl} , n_{pl} , H_{pl} для полимерного раствора, описанного в части (а).

(c) Заводнение должно проводиться при постоянной объемной скорости закачки, равной $20 \text{ м}^3 / \text{сутки}$. Определите и постройте график давления закачки на забое (в МПа) в виде функции закачанного объема. Обоснуйте форму этой кривой с физической точки зрения.

(d) Для скважины с не обсаженным забоем определите скорость сдвига, которой подвергнется полимерный раствор. Предвещает ли эта скорость механическую деструкцию полимера?

Примите условия, что пласт имеет круглую форму с $R_e = 950 \text{ м}$ и $P_e = 18 \text{ МПа}$.

Дополнительные свойства следующие:

$$k = 0.05 \mu\text{м}^2, s_w = 0, R_w = 5 \text{ см}, H_t = 42 \text{ м}, \phi = 0.2, \text{ и } S_{2r} = 0.3.$$