

Мицеллярно-полимерное заводнение

С самых первых дней факт того, что капиллярные силы удерживают большое количество нефти в зонах, хорошо отмытых водой, является общепризнанным. Капиллярные силы являются следствием межфазного натяжения между нефтяной и водной фазой, противостоящего действующим извне вязкостным силам, и являются причиной того, что закачанная и погребенная вода, собранная в вал, на каком-то участке обходят нефть. И с самых первых дней применения методов повышения нефтеотдачи прилагались усилия вытеснить эту нефть за счет уменьшения межфазного натяжения между нефтью и водой. Хотя предлагалось много способов, которые проверялись в промысловых условиях, наиболее распространенным методом повышения нефтеотдачи за счет снижения межфазного натяжения является мицеллярно-полимерное заводнение.

Снижение межфазного натяжения дает дополнительную нефть за счет уменьшения капиллярных сил, которые оставляют нефть позади любого несмешивающегося вытеснения. Это улавливание лучше всего может быть выражено в виде конкуренции между вязкостными силами, которые мобилизуют нефть, и капиллярными силами, которые улавливают нефть. Локальное капиллярное число N_{vc} - безразмерное соотношение капиллярных и вязкостных сил – определяет остаточную нефть и водонасыщенность через кривую капиллярного осушения. В Разделе 3-4 дается общее представление о кривой капиллярного осушения и капиллярном числе. В этой главе мы подробно остановимся на аспектах, имеющих отношение к мицеллярно-полимерному заводнению. Вспомните, что требуются сверхнизкие межфазные натяжения - порядка $1 \mu\text{Н/м}$ - и эти значения могут быть достигнуты только за счет применения химических веществ с высокой поверхностной активностью.

9-1 Процесс мицеллярно-полимерного заводнения

Мицеллярно-полимерное заводнение – это процесс, в котором производится *закачка* поверхностно-активного агента (ПАВ) для повышения нефтеотдачи. Это определение исключает щелочное заводнение (см. Главу 10), в котором ПАВ образуется в пласте, и другие процессы повышения нефтеотдачи, в которых снижение капиллярных сил не является основным средством добычи нефти.

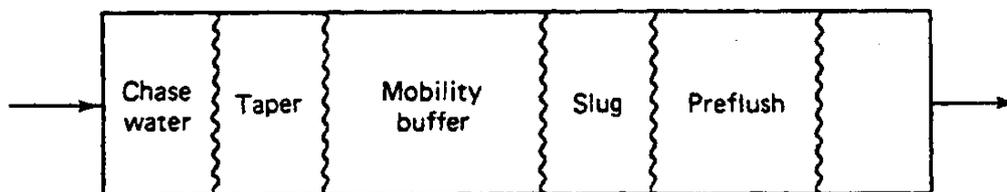
Мицеллярно-полимерное заводнение появилось в технической литературе под многими названиями: заводнение детергентами, ПАВ-вами, заводнение с низким межфазным натяжением, заводнение растворимой нефтью, микроэмульсионное и химическое заводнение. Мы используем термин *мицеллярно-полимерное* заводнение, т.к. этот термин является в меньшей степени неопределенным (например, термин химическое заводнение может использоваться для описания всех нетермических процессов повышения нефтеотдачи) и в наибольшей степени всеобъемлющим (ни одно из других названий не указывает на присутствие полимерного компонента). Кроме того, несколько названий включает в себе определенную последовательность и тип закачиваемых жидкостей, а так же определенный характер самой мицеллярно-полимерной оторочки. Несмотря на то, что между процессами существует определенное различие, мы остановимся на сходстве, т.к. его больше, и оно имеет большое значение.

На Рис.9 представлена идеализированная версия мицеллярно-полимерного заводнения. Процесс, как правило, применяется в третичных заводнениях и всегда осуществляется в режиме вытеснения (не в циклическом режиме). Полный процесс включает в себя следующее:

Предварительная закачка. Это закачка какого-то объема минерализованной воды с целью изменить (как правило снизить) минерализацию пластовой жидкости с тем, чтобы смешивание с ПАВ не вызвало потерю межфазной активности. Объем предварительной закачки колеблется от 0% до 100% заводняемого порового объема пласта (V_{pf}). В некоторых процессах в предварительную закачку добавляется так называемый жертвенный агент, чтобы уменьшить последующее удерживание ПАВ (Холм, 1982).

Мицеллярно-полимерная оторочка. Объем мицеллярно-полимерной оторочки, колеблясь от 5% до 20% V_{pf} в промышленных применениях, содержит главный нефтедобывающий агент – основное ПАВ. Для достижения поставленных целей обычно требуется несколько других химреагентов (Рис.9-1). Позднее мы подробнее рассмотрим предназначение этих реагентов.

Буферная оторочка, регулирующая подвижность. Эта жидкость представляет собой разбавленный раствор водорастворимого полимера, цель которого заключается в вытеснении мицеллярно-полимерной оторочки и собранных в вал жидкостей к добывающим скважинам. Вся технология полимерного заводнения, рассмотренная нами в Главе 8, распространяется на разработку и реализацию буферной оторочки, регулирующей подвижность. Поэтому в этой главе мы уделяем относительно мало внимания буферной оторочке, хотя имеется хорошее доказательство (см. Рис.9-33) то, что этот объем имеет большое значение для нефтедобывающей способности всего процесса.



Буферная оторочка, регулирующая подвижность
 250-2500 гр/м³ – полимер
 0-1% - спирт
 Стабилизирующие агенты
 Биоцид
 0-100% V_{pf}

Оторочка
 1-20% - ПАВ
 0-5% - спирт
 0-5% - содетергент
 0-90% - нефть
 Полимер
 5-20% V_{pf}

Предварительная закачка
 Электролит (Na^+ , Ca^{++} , и т.д.)
 Жертвенные химреагенты
 0-100% V_{pf}

Рис.9-1 Идеализированное типичное мицеллярно-полимерное заводнение в разрезе (Лэйк, 1984)

Целевая нефть для мицеллярно-полимерного заводнения – остаточная нефть – отличается от целевой нефти полимерного заводнения – подвижной нефти.

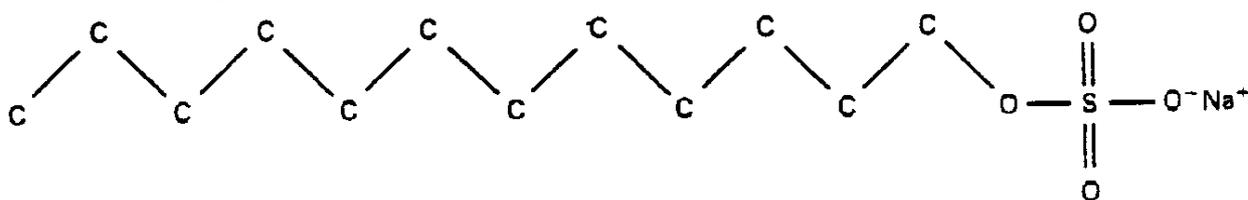
Буферная оторочка, регулирующая подвижность, с уменьшающейся концентрацией. Это какой-то объем минерализованной воды, содержащей полимер, концентрация которого постепенно уменьшается с концентрации, равной концентрации полимера в первой буферной оторочке на переднем крае (пик) до нулевой концентрации на заднем крае. Постепенное уменьшение концентрации ослабляет эффект неблагоприятного соотношения подвижностей между буферной оторочкой, регулирующей подвижность, и продавочной водой.

Продавочная вода. Цель продавочной воды – сократить расходы, связанные с непрерывной закачкой полимера. Если правильно рассчитать первую буферную оторочку и буферную оторочку с меняющейся концентрацией полимера, мицеллярно-полимерная оторочка будет добыта прежде, чем в нее проникнет эта жидкость.

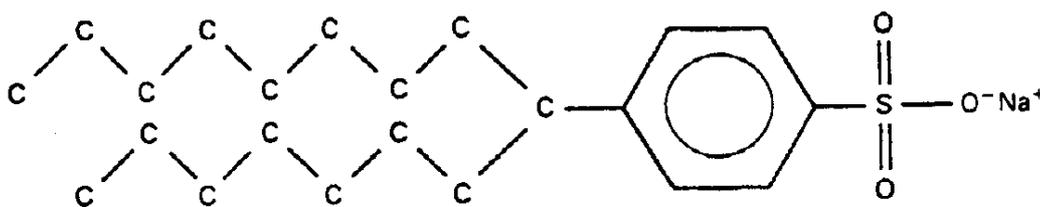
9-2 Поверхностно-активные вещества

Т.к. от мицеллярно-полимерного ПАВ требуется очень многое, мы рассмотрим здесь растворы ПАВ. Это рассмотрение является ничем иным как кратким изложением обширной литературы по свойствам ПАВ. (См. Акстинат, 1981, для получения более подробной информации по нефтедобывающим ПАВ-вам.)

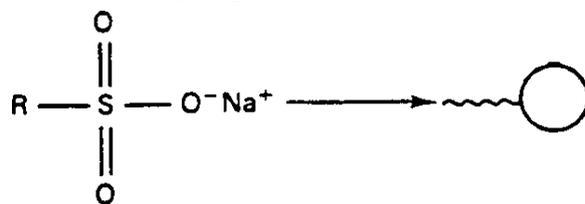
Типичный мономер ПАВ состоит из неполярной (липофильной) части или *половины* и полярной (гидрофильной) половины; весь мономер иногда называют *амфифилом* из-за его двойственного характера. На Рис.9-2(a) и 9-2(b) показана молекулярная структура двух



(a) Натрийдодецилсульфат



(b) Сульфонат Техас № 1



R = hydrocarbon group (nonpolar)

(c) Промышленные нефтяные сульфонаты

Рис.9-2 Характерные молекулярные структуры ПАВ (Лэйк, 1984)

обыкновенных ПАВ и проиллюстрировано условное обозначение мономеров ПАВ: мономер представлен в виде «головастика»: неполярная половина – хвост и полярная – голова.

ПАВ-ва классифицируются на четыре группы в зависимости от их полярных компонентов (Таблица 9-1).

Анионактивные. По условиям электронной нейтральности молекула анионактивного (отрицательно заряженного) ПАВ (в отличие от мономера) не заряжена катионом неорганического металла (обычно натрия), связанного с мономером. В водном растворе молекула ионизируется, высвобождая катионы и анионный мономер. Анионактивные ПАВ-ва наиболее часто применяются в мицеллярно-полимерном заводнении, т.к. они являются хорошими ПАВ-вами, относительно стойкими к удерживанию, стабильными, и могут быть относительно дешевыми.

Катионактивные. Если полярная доля заряжена положительно, ПАВ-ва являются катионактивными. В этом случае молекула ПАВ содержит неорганический катион, уравновешивая заряд. Катионактивные ПАВ-ва мало используются в мицеллярно-полимерном заводнении, т.к. сильно адсорбируются анионными поверхностями глин.

Неионогенные. Класс ПАВ-в, которые широко использовались в мицеллярно-полимерном заводнении, главным образом, в виде содетергентов, но теперь все в большей мере применяются в качестве основных ПАВ, представлен неионогенными ПАВ. Эти ПАВ-ва не образуют ионных связей, но при растворении в водных растворах проявляют свойства ПАВ за счет электроотрицательных контрастов между своими составляющими. Неионогенные ПАВ-ва менее чувствительны к действию высокой минерализации, чем анионактивные ПАВ-ва, и всегда считались худшими ПАВ-вами.

Амфотерные. Этот класс ПАВ-в имеют признаки двух или нескольких других классов. Например, амфотерное ПАВ может содержать как анионную группу, так и неполярную группу. Эти ПАВ в процессах добычи нефти не использовались.

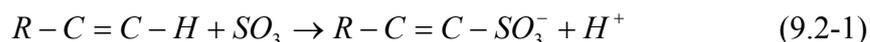
Таблица 9-1 Классификация и примеры ПАВ-в (Акстинат, 1981)

Анионактивные	Катионактивные	Неионогенные	Амфотерные
Сульфонаты Сульфаты Карбоксилаты Фосфаты	Четвертичные органические аммониевые соединения, Пиридин, Имидазолин, Пиперидин, Сульфониевые соединения	Алкил-, Алкил-арил-, ацил-, ациламиндо-, ацил-аминполигликоль и полиоловые эфиры Алканоламиды	Аминокарбоксилые кислоты

В пределах одного класса существует огромное множество возможных ПАВ. Рис.9-2 показывает часть этого многообразия, демонстрируя различия в неполярном молекулярном весе (C_{12} - додецилсульфат натрия по сравнению с C_{16} – Техас №1), идентичность полярной составляющей (сульфат и сульфонат), разветвление хвостовой части (прямая цепь у додецилсульфата натрия и два хвоста у Техас №1) – и все это в одном классе анионактивных ПАВ.

Помимо этих различий отмечаются вариации как в месте прикрепления полярной части, так и в количестве полярных составляющих (например, моносульфонаты и дисульффонаты). Даже небольшие видоизменения могут очень сильно изменить свойства ПАВ. Например, сульфаты менее термостойкие, чем сульффонаты. (Более подробная информация о влиянии структуры на свойства ПАВ представлена в работах Грация и др., 1981; Бараката и др., 1983.)

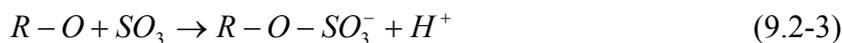
В мицеллярно-полимерном заводнении в качестве основного ПАВ наиболее широко используются нефтяные сульффонаты. Это - анионактивные ПАВ, полученные сульффонированием чистого органического химического вещества (иногда именуемого синтетическим сульффонатом), пара нефтехимической переработки с промежуточным молекулярным весом, или в некоторых случаях даже самой нефти. Если $R - C = C - H$ представляет собой молекулярную формулу исходного сырья, реакция сульффонирования протекает как:



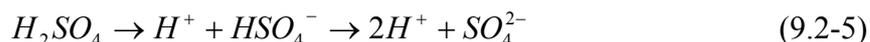
Реакция может также протекать, насыщая двойную связь углерод-углерод



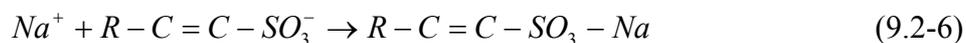
Здесь мы примем условное обозначение, которое показывает только атомы, участвующие в химической реакции. ПАВ, полученное в уравнении (9.2-1), является α -олефинсульфонатом, а ПАВ, полученное в уравнении (9.2-2) – алкилсульфонатом. Если в качестве исходного сырья используется ароматический углеводород, сульффонирование дает алкилбензолсульфонат



Сульфат в этих реакциях образуется в результате барботирования SO_3 (газ) через исходное сырье или за счет контактирования с растворителем, в котором SO_3 растворяется. Реакции сульффонирования (уравнения 9.2-1 – 9.2-3) дают сильно кислый водный раствор за счет параллельных реакций



Впоследствии рН раствора восстанавливают до нейтрального значения за счет добавления сильного основания, например, NaOH или NH_3 , растворенного в воде. Этот этап нейтрализации, кроме того, обеспечивает противоион для сульффоната; для α -олефинсульфоната это:



Если в качестве исходного сырья используется неочищенный продукт, в результате сульффонирования будет получена смесь ПАВ-в разных типов. Смесь может содержать целый спектр изомерных форм, молекулярных весов и степеней сульффонирования (моно- и дисульффонирование). Смесь чрезвычайно трудно охарактеризовать, за исключением нескольких макроскопических свойств. В Таблице 9-2 перечислены некоторые типовые свойства промышленных сульффонатов. Типичный диапазон молекулярного веса – 350-450 кг/кг-моль, нижние значения означают более высокую растворимость в воде. В некоторых расчетах вместо молекулярного веса лучше использовать эквивалентную массу ПАВ (молекулярный вес, разделенный на заряд). Так, у моносульфонатов эквивалентная масса (масса на эквивалент) и молекулярная масса одинаковы. Некоторые продукты содержат примеси: непрореагировавшую нефть со стадии сульффонирования и воду после нейтрализации. Часть ПАВ, в том виде, в котором его закупают, является неактивной. Поскольку нас

Таблица 9-2 Свойства некоторых промышленных анионоактивных ПАВ

Фирма	Название ПАВ	Молекулярный вес	Активность (вес.%)	Нефть (вес.%)	Вода (вес.%)	Соль (вес.%)	Тип
ALCOLAC	SIPONATE	350	98.0				Натрий додецилбензолсульфонат
ALCOLAC	SIPONATE	350	70.0				
CONOCO	AES 14125		58.3	1.7			Сульфаты альфоновых эфиров
CONOCO	AES 14125		60.0	3.0			Сульфаты альфоновых эфиров
EXXON	RL 3070	334	60.0	14.0	25.2		Алкиларилнатриевые сульфаты
EXXON	RL3011	375	64.4	25.2	10.0		Алкиларилнатриевые сульфаты
EXXON	RL 3330	390	66.0	24.0	9.5		Алкиларилнатриевые сульфаты
EXXON	RL 3331	391	65.0	26.5	8.1		Алкиларилнатриевые сульфаты
EXXON	RL 3332	460	60.0	31.4	8.1		Алкиларилнатриевые сульфаты
EXXON	RL 2917	515	65.7	25.7	8.5		Алкиларилнатриевые сульфаты
KAO	LS 8203	330	65.0		53.0		Линейные алкилсульфонаты
KAO	LS 8203	480	44.1	54.6	0.06		Линейные алкилсульфонаты
LION	LEONOX E		94.0	2.0		2.0	Альфаолефинсульфонат
LION	LEONOX D	350	94.0	2.0		3.0	
LION	LION AJS-2	375	35.0				Сульфаты альфоновых эфиров
LION	LEONOX K	570	30.0				
SHELL	ENORDET AOS 310-40	317	38.0		61.0	<1	Alcohol ethoxy sulfonate ?
SHELL	ENORDET LXS 370-60	375	60.1		38.0	1.9	Линейные алкилксилосульфаты
SHELL	ENORDET LXS 395-60	395	60.0		37.4	2.6	Линейные алкилксилосульфаты
SHELL	ENORDET LXS 420-60	417	60.6		36.6	2.8	Линейные алкилксилосульфаты
SHELL	ENORDET 3ES-441-60	441	59.3		29.5	1.2	Линейные алкилксилосульфаты
STEPAN	PS HMW		50.7	24.4	22.1		
STEPAN	PS MMW		53.2	18.4	26.6		
STEPAN	PS 360	360	65.8	18.9	12.4		
STEPAN	PS 420	420	56.1	13.0	28.8		
STEPAN	PS 465	464	58.7	14.9	24.2		
WITCO	TRS 40	330-350	40-43	18.0	40.0		
WITCO	TRS 10-410	415-430	61-63	30.0	4-5		
WITCO	TRS 16	440-470	61-63	32.5	4-5		
WITCO	TRS 18	490-500	61-63	32.5	4-5		

интересует само ПАВ-во, в понятие концентрации оторочки должна вкладываться только концентрация ПАВ (100% активного вещества).

В последующем обсуждении мы не будем принимать во внимание различия между типами ПАВ, а будем просто рассматривать структуру ПАВ в виде головастика, представленную на Рис.9-2.

Если анионоактивное ПАВ растворить в водном растворе, ПАВ диссоциируется на катион и мономер. Если концентрация ПАВ затем повышается, это означает, что липофильные составляющие ПАВ начинают ассоциироваться между собой, образуя агрегаты или мицеллы, каждая из которых содержит несколько мономеров. График зависимости концентрации мономера ПАВ от общей концентрации ПАВ (Рис.9-3) представляет собой кривую, которая начинается в начале координат, монотонно возрастает с углом наклона, равным единице, и затем выравнивается при *критической концентрации мицеллообразования* (ККМ). Выше ККМ любое дополнительное увеличение концентрации ПАВ вызовет только увеличение концентрации мицелл. Т.к. ККМ обычно весьма невелики (примерно $10^{-5} - 10^{-4}$ кг-моль/м³), почти при всех концентрациях, имеющих практическое значение для мицеллярно-полимерного заводнения, ПАВ находится, преимущественно, в виде мицеллы. Отсюда происхождение названия заводнения – мицеллярно-полимерное. На Рис.9-3 и всех последующих дается схематическое изображение мицелл. Действительные структуры мицелл не бывают статическими и могут принимать различные формы.

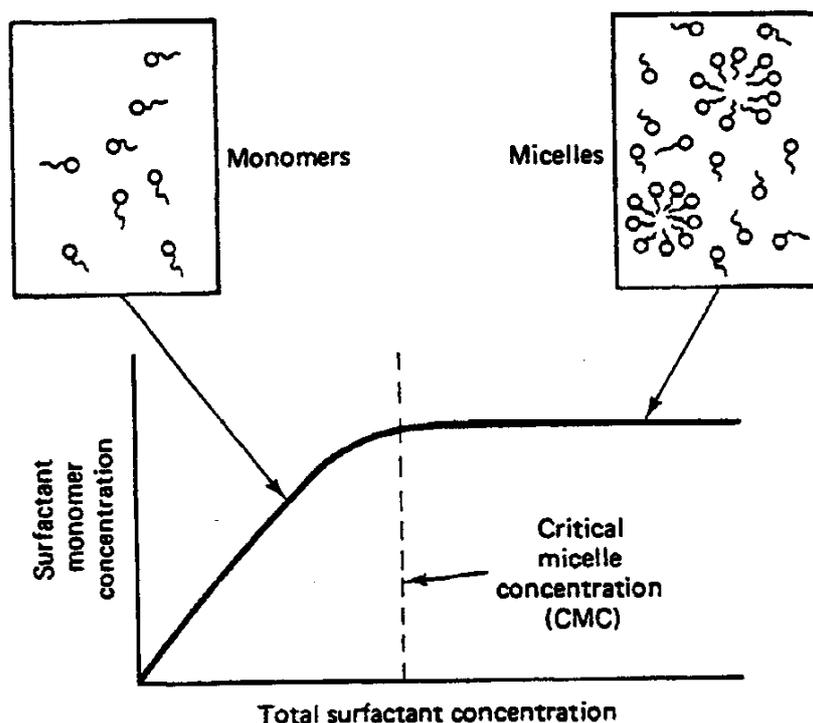


Рис.9-3 Схематическое изображение критической концентрации мицеллообразования (Лэйк, 1984)

Когда этот раствор контактирует с олеиновой фазой (термин *олеиновая фаза* означает, что эта фаза может содержать не только нефть), ПАВ имеет тенденцию скапливаться на промежуточной поверхности раздела. Липофильная составляющая «растворяется» в олеиновой фазе, а гидрофильная часть – в водной фазе. ПАВ предпочитает поверхность раздела в виде мицеллы; однако для насыщения поверхности раздела требуются незначительные концентрации ПАВ. Двойственный характер ПАВ имеет большое значение,

т.к. скопление на поверхности раздела вызывает уменьшение межфазного натяжения между двумя фазами. Межфазное натяжение между двумя фазами является функцией избыточной концентрации ПАВ на поверхности раздела. Избыток – это разница между концентрацией на поверхности раздела и в объеме. Поверхность раздела размывается как поверхности раздела пара и жидкости около критической точки.

Само ПАВ и сопутствующие условия должны быть подогнаны таким образом, чтобы максимально увеличить этот эффект, но это влияет на растворимость ПАВ в объеме олеиновой и водной фаз. Т.к. эта растворимость, кроме того, затрагивает взаимную растворимость минерализованной воды и нефти, что также влияет на межфазные натяжения, это обсуждение естественным образом подводит нас к теме фазового поведения ПАВ – нефти – минерализованной воды. Любопытно, что сама по себе концентрация ПАВ играет в дальнейшем довольно незначительную роль по сравнению с температурой, минерализацией воды и жесткостью. Это относится ко многим мицеллярным свойствам.

9-3 Фазовое поведение ПАВ – минерализованная вода – нефть

Фазовое поведение ПАВ-минерализованной воды-нефти условно иллюстрируется на тройной диаграмме (см. Раздел 4-3). Условно верхняя вершина тройной диаграммы представляет псевдокомпонент ПАВ ($i=3$), нижняя левая вершина – минерализованную воду ($i=1$), а нижняя правая – нефть ($i=2$). В Таблице 9-3 представлены эти и другие соглашения об обозначениях.

Таблица 9-3 Обозначения и единицы измерения, принятые для мицеллярно-полимерного заводнения

i	Вещества	Единицы измерения концентрации
1	Вода	Объемная доля
2	Нефть	Объемная доля
3	ПАВ	Объемная доля
4	Полимер	Вес.% или г/м ³
5	Анион	мэк./см ³ -порой объем
6	Двухвалентные в-ва	мэк./см ³ -порой объем
7	Содетергент	Объемная доля
8	Одновалентные в-ва	мэк./см ³ -порой объем

j	Фаза
1	Водная
2	Олеиновая
3	Микроэмульсионная

На мицеллярно-полимерное фазовое поведение очень сильно влияет минерализация воды. Рассмотрим последовательность изменения фазовых диаграмм, Рис.9-4 – 9-6, по мере увеличения минерализации воды. Фазовое поведение, которое мы сейчас рассматриваем, первоначально было введено Уинсором (1954) и позднее применено к мицеллярно-полимерному заводнению (Хили и др., 1976; Нелсон и Поуп, 1978).

При низкой минерализации воды типичное ПАВ, применяемое для мицеллярно-полимерного заводнения, проявит хорошую растворимость в водной фазе и слабую – в нефтяной. Поэтому весь состав вблизи границы раздела воды – нефти на тройной диаграмме разделится на две фазы: избыточную нефтяную фазу, являющуюся, по существу, чистой

нефтью, и микроэмульсионную фазу (в воде), которая содержит минерализованную воду, ПАВ и какое-то количество солюбилизированной нефти. Солюбилизированная нефть встречается, когда нефть занимает центральное ядро набухших мицелл. Рабочие линии в двухфазной области имеют отрицательный угол наклона. Этот тип фазовой среды называют по-разному: системой Винзора I типа, нижнефазная микроэмульсия (т.к. она более плотная, чем избыточная нефтяная фаза) или система типа II(-). Мы выбрали термин - система типа II(-). II означает, что могут образоваться (не обязательно) две фазы, а (-) означает, что рабочие линии имеют отрицательный угол наклона (Рис.9-4). Точка полного смешения частично смешивающихся жидкостей в такой системе P_R обычно располагается довольно близко к вершине нефти. В целом состав, находящийся выше бинадальной кривой, является однофазным.

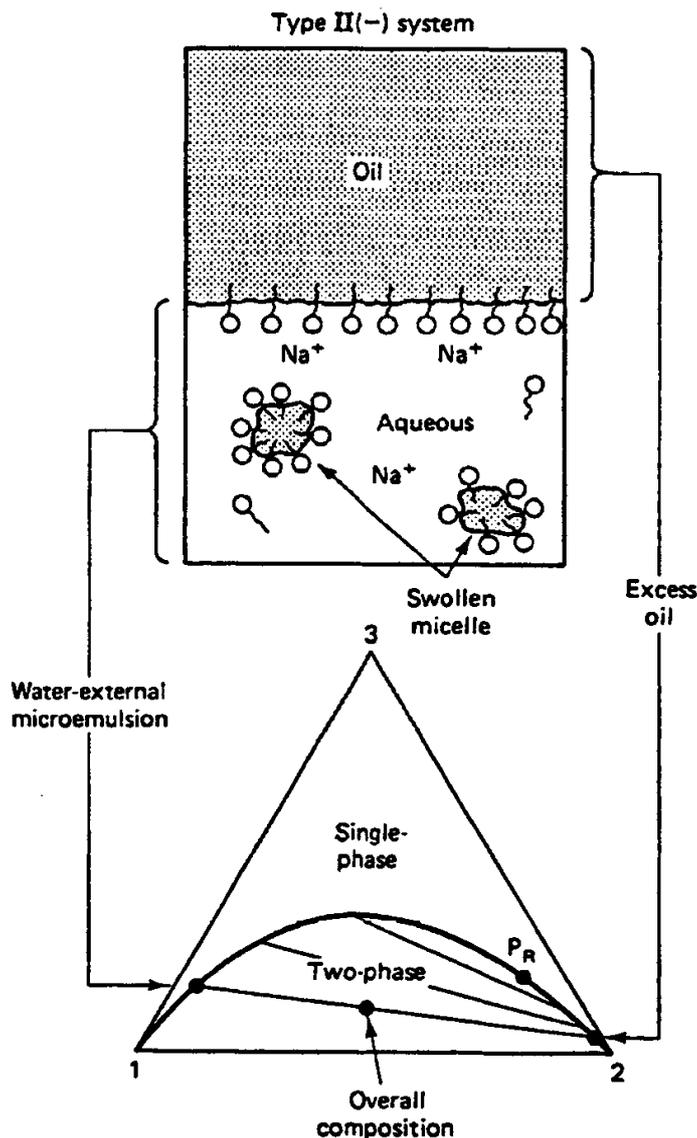


Рис.9-4 Схематические изображения системы типа II(-) (Лэйк, 1984)

При наличии сильно минерализованных вод (Рис.9-5) электростатические силы значительно снижают растворимость ПАВ в водной фазе. Состав в пределах двухфазной области в таком случае разделяется на избыточную водную фазу и микроэмульсию (с внешней нефтяной фазой), содержащую большую часть ПАВ и какое-то количество солюбилизированной воды. Вода солюбизируется за счет образования обращенных разбухших мицелл с водой в центре. Фазовое окружение представляет собой систему Винзора II типа – верхнефазную микроэмульсию – или систему типа II (+). Теперь точка

полного смешения частично смешивающихся жидкостей P_L находится близко к вершине воды.

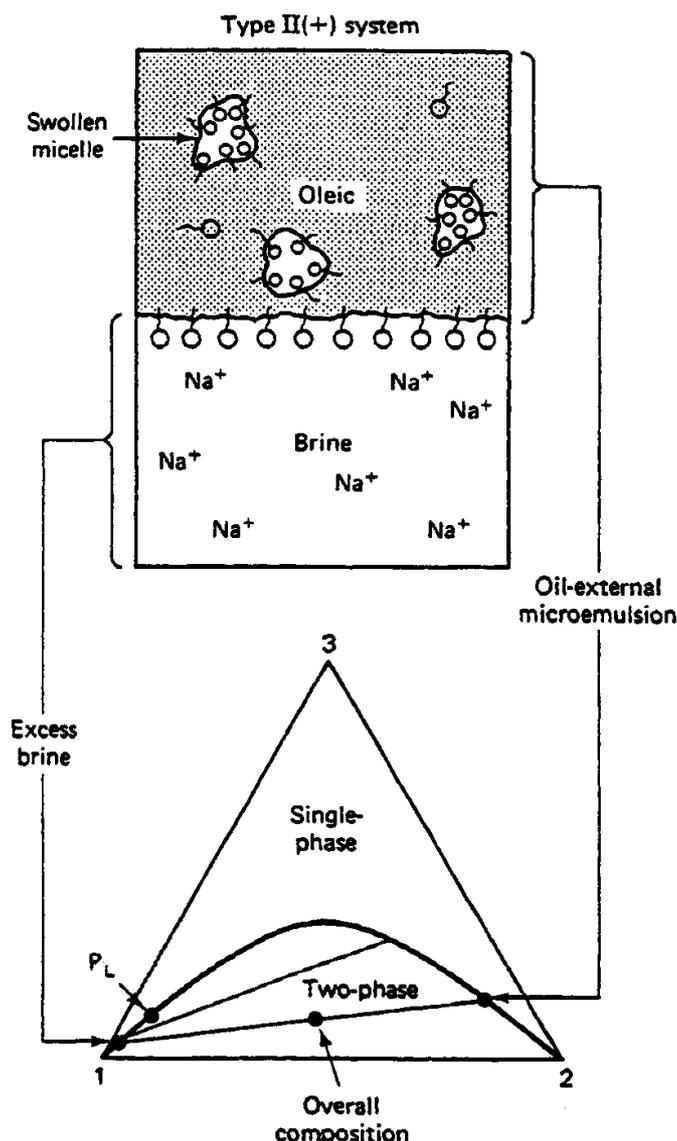


Рис.9-5 Схематическое изображение сильно минерализованной системы типа II(+) (Лэйк, 1984)

Две представленные крайние ситуации можно приблизительно назвать зеркальным отображением: микроэмульсионная фаза является сплошной водной фазой в системах типа II(-) и сплошной нефтяной фазой в системах типа II(+). Вызванная солубилизация нефти в фазе, насыщенной водой (система типа II(-)), свидетельствует о механизме экстракции в процессе добычи нефти. Хотя экстракция и играет некоторую роль, она невелика по сравнению с эффектами межфазного натяжения, рассматриваемыми ниже, особенно, когда рассматривается фазовое поведение при средних минерализациях.

При минерализациях, средних между теми, что представлены на Рис. 9-4 и 9-5, должно происходить непрерывное изменение между системами II(-) и II(+) типа. Видимое изменение поворота рабочей линии против часовой стрелки и соответствующее смещение точки полного смешения частично смешивающихся жидкостей неверно; нет минерализации, при которой растворимость ПАВ в фазе, насыщенной водой, и в фазе, насыщенной нефтью, были бы точно равны. Но существует диапазон минерализаций, при которых образуется третья фаза, насыщенная ПАВ (Рис.9-6). Состав в трехфазной области разделяется на избыточную нефтяную и водную фазы, как при окружении типа II(-) и II(+), и микроэмульсионную фазу, чей состав представлен инвариантной точкой. Это окружение

называется системой Винзора III типа – среднефазной микроэмульсией – или системой III типа. В направлении верхнего правого и

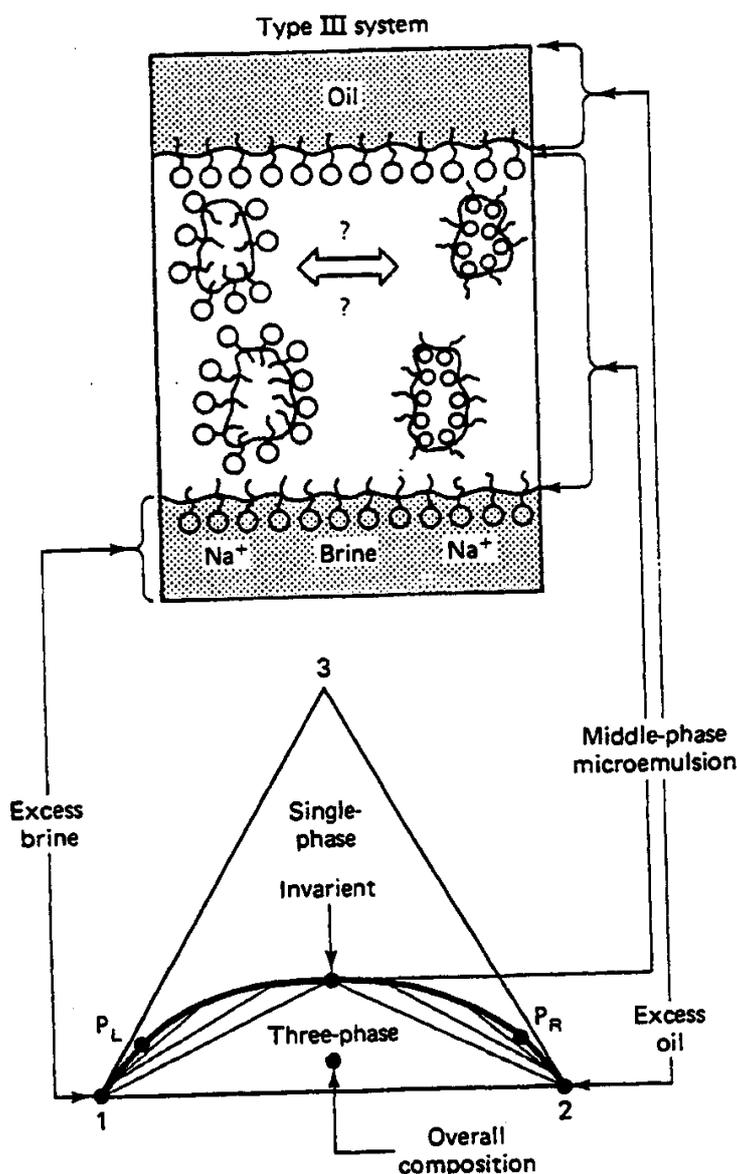


Рис.9-6 Схематическое изображение системы III типа при оптимальной минерализации (Лэйк, 1984)

левого угла от трехфазной области располагаются доли II(-) и II(+) типа, в которых, как и раньше, будут образовываться две фазы. Ниже трехфазной области находится третья двухфазная область (по условиям термодинамики), протяженность которой обычно столь мала, что она не учитывается (Андерсон и др., 1976). В трехфазной области отмечается два межфазных натяжения: между микроэмульсией и нефтью σ_{32} и микроэмульсией и водой σ_{31} .

На Рис.9-7 – призматической диаграмме – представлен весь путь фазовых окружений от типа II(-) до II(+). Область III типа образуется за счет разделения критической рабочей линии (которая расположена вблизи границы вода-нефть) по мере увеличения минерализации до C_{Sel} (Беннет и др., 1981). Вторая критическая рабочая линия также разделяется при C_{Seu} по мере того, как минерализация уменьшается после окружения II(+) типа. В диапазоне минерализаций III типа инвариантная точка М смещается от нефтяной вершины до водной вершины перед тем, как исчезнуть на соответствующих критических рабочих линиях. В равной степени важно, что по мере того, как происходит смещение,

концентрация ПАВ в микроэмульсионной фазе проходит через минимум вблизи, где водонефтяное отношение в инвариантной точке становится равным 1.

Смещение инвариантной точки предполагает по существу неограниченную

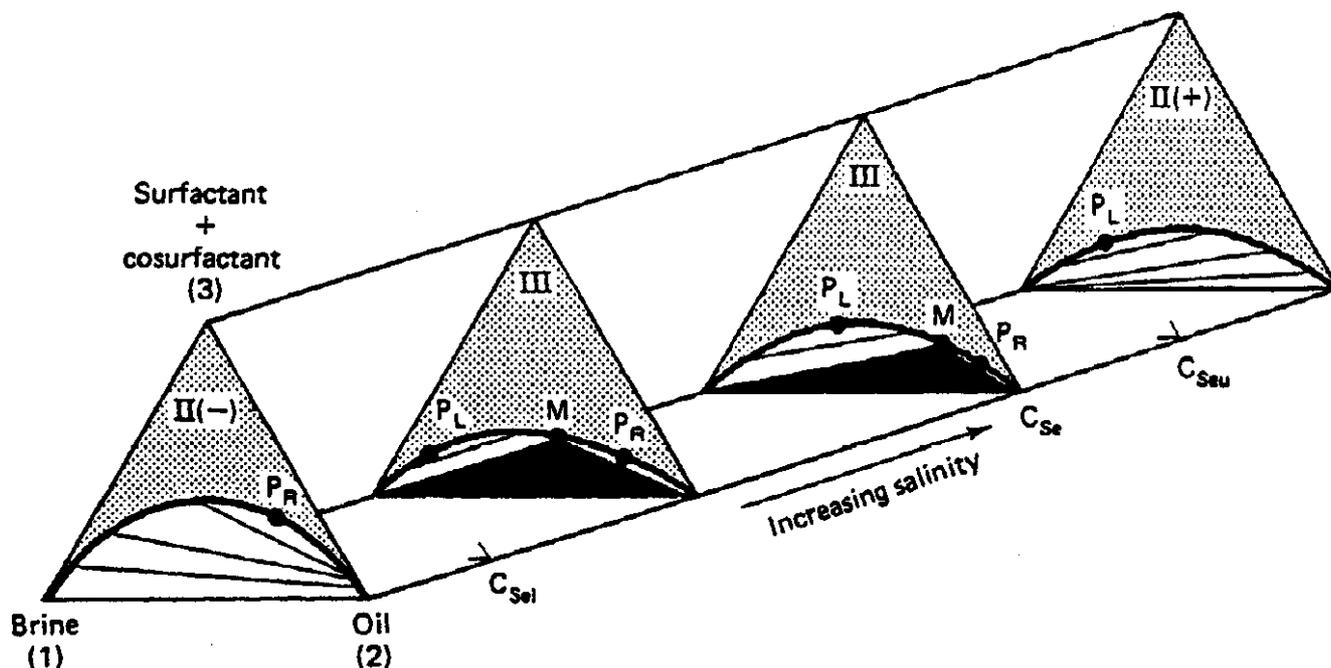


Рис.9-7 Псевдотройная или «тентообразная» диаграмма, отображающая мицеллярно-полимерное фазовое поведение (Лэйк, 1984)

растворимость воды и нефти в одной фазе. Это вызвало всесторонние исследования природы III типа (Скривен, 1976). Среднефазная микроэмульсия не может быть одновременно с внешней нефтяной и водной фазой. В какой-то точке между C_{Sel} и C_{Seu} содержащиеся здесь мицеллы претерпевают инверсию, и многие фазовые свойства (например, удельная электропроводность) резко меняются от характерных для воды на свойства, характерные для нефти. Кроме того, несколько других свойств (см. Рис.9-13) приобретают экстремальные значения. Минерализация фазового обращения не обязательно означает оптимальную минерализацию, хотя с точки зрения логики такой вывод напрашивается.

Кроме содержания электролита в воде, несколько других переменных могут осуществить изменения фазового окружения, показанные на Рис.9-7. Как правило, изменение любого условия, которое приводит к повышению растворимости ПАВ в нефти, вызывает смещение от типа II(-) к II(+). Наиболее важные моменты мы рассмотрим ниже.

Структура ПАВ

В общих чертах, увеличение значимости неполярного конца ПАВ повышает растворимость нефти. Такие изменения включают увеличение молекулярного веса неполярного конца, уменьшение разветвления хвостовой части (Грация и др., 1981), уменьшение количества полярных составляющих (от дисульфоноватов к моносульфоноватам) и уменьшение силы полярной составляющей.

Два общеизвестных критерия конкуренции между гидрофильной и липофильной частью определяют растворимость нефти. Плотность заряда ПАВ – это число диссоциированных ионов на молекулу, разделенное на молекулярный размер. По мере увеличения плотности заряда растворимость ПАВ в воде возрастает. Вторым критерием является число гидрофильно-липофильного баланса (ГЛБ). У ПАВ определенного типа (например, неионогенных ПАВ) число ГЛБ попросту связано с молекулярной структурой. Но

у других число ГЛБ не может быть однозначно определено, не говоря уже о нефти или воде, за которые происходит конкуренция (Шинода и Куниэда, 1979).

Хотя оба критерия пользовались определенным успехом, их трудно применять к нефтяным сульфонатам из-за содержащихся в них большого разнообразия химических видов.

Содетергенты

Одно из первых применений содетергентов заключалось в регулировании псевдокомпонента ПАВ с тем, чтобы переход II(-) → II(+) происходил при разных минерализациях. Водорастворимый содетергент (например, третичный амиловый спирт, вторичный нефтяной сульфат или n-бутанол) также повышает растворимость ПАВ в воде. Высокомолекулярные спирты повышают растворимость ПАВ в нефти (Солтер, 1977). Боуррел и др. (1978) вывели правила смешиваемости смесей ПАВ – содетергент.

Свойства нефти

Если бы нефть можно было сделать более полярной, она бы действовала как более эффективный растворитель для ПАВ, ускоряя переход II(-) → II(+). Существует несколько критериев для определения этой тенденции. Сырые нефти с высоким удельным весом имеют стремятся обогатиться органическими кислотами; поэтому растворимость ПАВ в нефти ниже в случае нефти с высоким удельным весом (Пуэрто и Рид, 1982). Так же нефти с низким удельным весом ведут себя аналогичным образом (Нелсон, 1982). Кэш и др. (1976) предлагали в качестве критерия влияния нефти на фазовое поведение ПАВ-воды-нефти использовать сравнение переходов, наблюдавшихся при применении сырой нефти и очищенного углеводорода. Во всех случаях в качестве ПАВ использовался Техас №1 (Рис.9-2) в растворе NaCl. Если переход II(-) → II(+) при использовании сырой нефти происходит при той же минерализации, что и у линейного алкана, алкановое углеродное число очищенной нефти и эквивалентное алкан - углеродное число сырой нефти равны. Поэтому эквивалентное алкан-углеродное число относительно легко измерить, и оно показывает какую модельную нефть нужно использовать в составе. Та же идея может использоваться для распределения по категориям ПАВ (Грация и др., 1981).

Повышение температуры

В тенденции ПАВ растворяться в нефти с повышением температуры мало универсальности. Для большинства анионоактивных ПАВ повышенные температуры означают повышенную растворимость в воде (Нелсон и Поуп, 1978). Эта тенденция обратная для большинства неионогенных ПАВ.

Уменьшение давления

Мицеллярно-полимерное фазовое поведение, являющееся полностью жидкостной системой, относительно не чувствительно к давлению. Но Нелсон (1982) отметил значительное действие давления в газосодержащих нефтях. Интересно, что тенденция, упоминаемая здесь, соответствует тенденции, упомянутой выше для свойств нефти: по мере того, как удельный объем нефти увеличивается (за счет пониженного давления), ПАВ лучше растворяется в воде.

Уменьшение растворимости ПАВ в нефти вызовет обратные изменения. Таким образом, Рис.9-7 можно было бы нарисовать заново с любой из вышеупомянутых переменных на основании призмы при увеличении переменной C_{sc} в направлении повышения растворимости в нефти. Эти наблюдения широко освещены в литературе по

вопросам мицеллярно-полимерного заводнения. Их полезность будет очевидной при рассмотрении вопроса межфазного натяжения в следующем разделе.

9-4 Неидеальные эффекты

Почти так же, как уравнение состояния идеального газа приблизительно выражает поведение реальных газов, Рис.9-4 – 9-6 приближенно выражают фактическое мицеллярно-полимерное фазовое поведение. Хотя неидеальности значительны во многих случаях, в этом разделе мы упомянем только наиболее значительные.

1. При высоких концентрациях ПАВ или низких температурах (Скривен, 1976; Хили и Рид, 1974) или даже в присутствии чистых ПАВ (Солтер, 1983), отмечались другие фазы, помимо тех, что представлены на Рис.9-7. Эти фазы приближаются к сильно вязким жидким кристаллам или конденсированному веществу в другом виде. Большие вязкости оказывают вредное действие на нефтеотдачу, т.к. они могут вызвать местную вязкостную нестабильность во время вытеснения или при пониженной приемистости. Часто спирты (соразтворители) с низкой – средней молекулярной массой добавляются в мицеллярно-полимерный состав, чтобы «расплавить» эти нежелательные вязкости. Т.к. большинство спиртов являются слабыми ПАВ, термин *содетергент* весьма популярен применительно к этим добавкам, как и при добавлении других ПАВ. В тех случаях, когда вода содержит полимер, конденсированная фаза возникает при низкой концентрации ПАВ из-за исключения полимера из микроэмульсионной фазы. Содетергенты могут использоваться для того, чтобы устранить эту несовместимость полимера и ПАВ (Трушенский, 1977).
2. В тех случаях, когда присутствуют содетергенты, неправильно собирать все химические реагенты в вершине, представляющей в призме ПАВ, как показано на Рис.9-7. Если содетергенты не разделяются с основным ПАВ в вытеснении, большая часть выгоды от добавления химического вещества теряется; поэтому разделение ПАВ – содетергента имеет большое значение. К числу усилий по избирательному разделению содетергента можно отнести четвертичное представление фазового поведения (Солтер, 1978) и теорию *псевдофаз* (Хирасаки, 1982).
3. Пределы минерализации III типа (C_{Sel} и C_{Seu}) являются функциями концентрации ПАВ. Эту зависимость можно пронаблюдать, наклонив вертикальные треугольные плоскости (Рис.9-7) относительно их оснований. Иногда это называют *эффектом разбавления*.

Один из способов графического представления эффекта разбавления – использовать диаграмму *условия минерализации* (Рис.9-8). Эта диаграмма представляет собой график зависимости общей концентрации ПАВ C_3 (горизонтальная ось) от минерализации (вертикальная ось). Все остальные переменные сохраняются без изменения. На Рис.9-8 минерализация представлена в виде процента разбавления конкретной сильно минерализованной воды. Верхняя кривая показывает границу между двумя типами окружающей среды – II(+) и III или кривую зависимости C_{Seu} от C_3 .

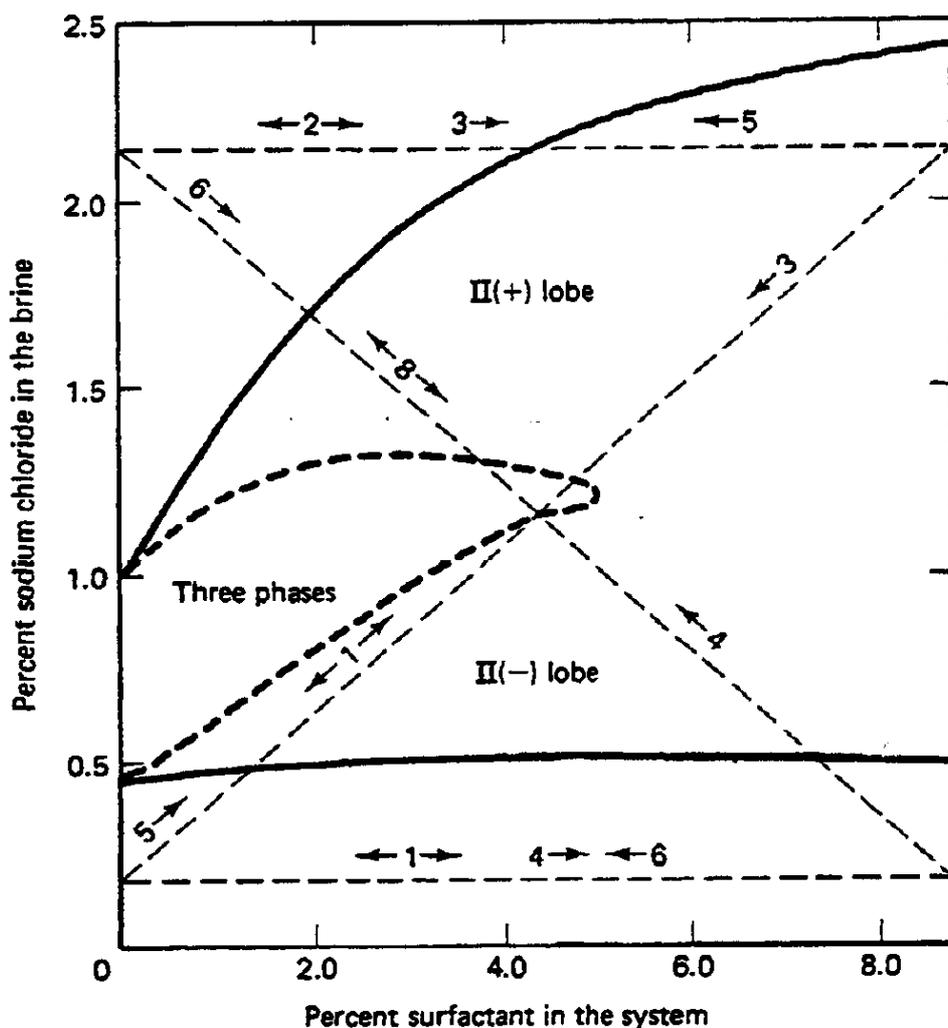


Рис.9-8 Диаграмма условия минерализации (Нелсон, 1982)

Аналогичным образом нижняя кривая показывает зависимость C_{Sel} от C_3 ; следовательно, область между двумя кривыми дает протяженность области III типа в виде функции C_3 . Другие графики (Гловера и др., 1979; Боуррела и др., 1978) изображают протяженность наблюдаемого трехфазного поведения аналогичным образом. Рис.9-8, кроме того, показывает трехфазную область в пределах области III типа.

Мицеллярно-полимерная система на Рис.9-8 показывает область III типа, которая уменьшается с минерализацией. Для других ПАВ и вод тенденция может быть полностью противоположной (Боуррел и др., 1978). При идеальном мицеллярно-полимерном поведении ни C_{Seu} , ни C_{Sel} не должны зависеть от C_3 – т.е. диаграмма условия минерализации должна состоять из двух горизонтальных линий. Часто мягкая вода приблизительно это и показывает, т.к. эффект разбавления особенно резко выражен, когда вода содержит значительное количество двухвалентных ионов.

4. Смещения фазового поведения характерны для определенного ионного состава воды, а не просто общей минерализации. Следовательно, как в и полимерном заводнении, недостаточно охарактеризовать воду просто «свежая» вода или с точки зрения общего количества растворенных в ней твердых веществ. Для анионоактивных ПАВ другие анионы в растворе мало воздействуют на мицеллярно-полимерное фазовое поведение, но катионы легко вызывают изменения фазового окружения. Двухвалентные катионы (чаще всего кальция или магния) обычно в 5-20 раз превышают по силе воздействия одновалентные катионы (обычно натрия). Двухвалентные катионы обычно присутствуют

в промысловых водах в меньших количествах, чем одновалентные катионы (Рис.8-1), но их воздействие столь значительно, что нужно, как минимум, отдельно учитывать минерализацию – общее количество твердых растворенных веществ – и жесткость – общую концентрацию двухвалентных катионов. Непостоянные соотношения одновалентных и двухвалентных катионов так же вызывают взаимодействия электролита с глинистыми минералами через катионообмен. Эффекты непропорциональности минерализации и жесткости учитываются путем определения взвешенной суммы концентраций одновалентных и двухвалентных катионов как «эффективной» минерализации C_{se} .

Воздействие минерализации, рассматриваемое здесь, имеет гораздо меньшее значение в случае неионогенных ПАВ, у которых ионные связи отсутствуют. Даже у анионоактивных ПАВ они могут быть в значительной мере ослаблены за счет добавления неионогенных содетергентов. Мономеры содетергента добавляют в мицеллу между более крупными мономерами основного ПАВ, тем самым, снижая плотность заряда на поверхности мицеллы и делая «смешанную» мицеллу более неионогенной.

9-5 Фазовое поведение и межфазное натяжение

Вы можете спросить, какое отношение имеет обсуждение мицеллярно-полимерного фазового поведения к добыче нефти за счет снижения межфазного натяжения. В ранней литературе, посвященной вопросам заводнения с применением мицеллярно-полимерных составов, содержится большой объем информации о методах измерения межфазного натяжения и описаны причины, обуславливающие низкие межфазные натяжения (Кэйиас и др., 1975). Межфазное натяжение зависит от типа и концентрации ПАВ, содетергента, электролита, нефти, полимера и температуры. Однако одним из наиболее существенных достижений во всей мицеллярно-полимерной технологии, несомненно, является тот факт, что все межфазные натяжения непосредственно соотносятся с мицеллярно-полимерным фазовым поведением. Хили и Рид (1974) первыми предложили корреляцию, которая была теоретически обоснована Хухом (1979), и экспериментально была подтверждена рядом других авторов (Глинсманн, 1979; Грациа и др., 1981).

Практическая выгода от этой корреляции не замедлила сказаться: относительно трудные измерения межфазного натяжения можно в значительной степени заменить относительно легкими измерениями фазовых поведений. Действительно, в последних публикациях выводы о характере межфазного натяжения делаются на основании исследований фазового поведения с использованием параметра солубилизации (Боуррел и др., 1978). Столь же важным является и то, что корреляция логически обеспечивает основу для разработки мицеллярно-полимерного состава. Мы рассмотрим этот вопрос в Разделе 9-13.

Для того, что продолжить исследование связи между межфазным натяжением и фазовым поведением, обозначим объемные доли нефти, воды и ПАВ в микроэмульсионной фазе S_{23} , S_{13} и S_{33} . Согласно Рис.9-4 – 9-6, микроэмульсионная фаза существует при любой минерализации; следовательно, все три величины хорошо определяются и являются непрерывными. Для систем, содержащих спирт, S_{33} является координатой ПАВ за вычетом содержимого содетергента. Параметры солубилизации между микроэмульсией – нефтяной фазой S_{32} для фазового поведения II(-) и III типа, и между микроэмульсией – водной фазой S_{31} для II(+) и III типа определяются как:

$$S_{32} = \frac{C_{23}}{C_{33}} \quad (9.5-1a)$$

$$S_{31} = \frac{C_{13}}{C_{33}} \quad (9.5-1b)$$

Межфазные натяжения между соответствующими фазами σ_{32} и σ_{31} являются эмпирическими функциями только S_{32} и S_{31} . Типичная корреляция представлена на Рис.9-9.

Рис. 9-10 по-иному показывает соответствующее поведение параметров солубилизации и межфазных натяжений. Рассмотрим геометрическое место точек при постоянных концентрациях нефти, воды и ПАВ, приведенное на Рис.9-7, но при меняющейся минерализации. Если неидеальные эффекты незначительны, и геометрическое место точек находится на участках низкой концентрации ПАВ и средних отношениях воды – нефти, σ_{32} будет определяться от низкой минерализации вплоть до C_{Seu} , а σ_{31} – от C_{Sel} до высоких минерализаций. Оба межфазных натяжения являются наименьшими в трехфазной области III типа между C_{Sel} и C_{Seu} , где оба параметра солубилизации большие. Кроме того, существует точная минерализация, при которой оба межфазных натяжения равны при значениях достаточно низких (примерно 1 мН/м) для хорошей нефтеотдачи. Такая минерализация является *оптимальной минерализацией* C_{Sopt} для этого конкретного состава ПАВ-вода-нефть, а общее межфазное натяжение является *оптимальным* межфазным натяжением.

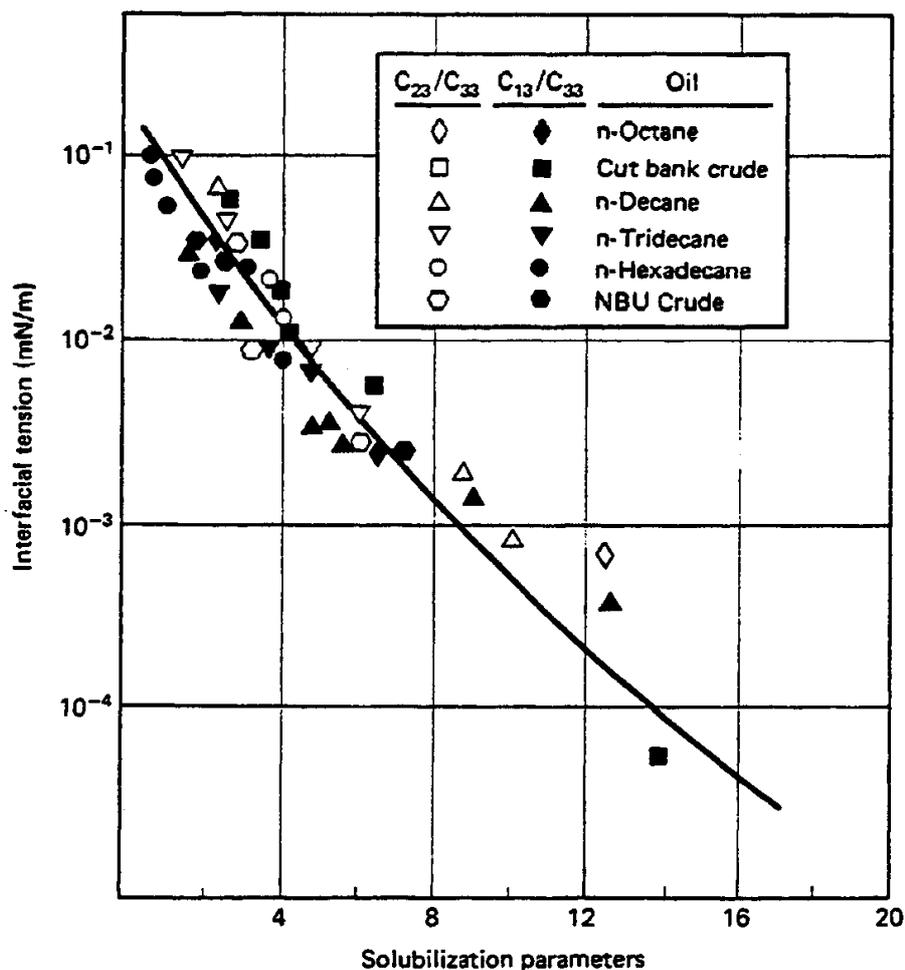


Рис.9-9 Корреляция параметров солубилизации с межфазными натяжениями (Глинсманн, 1979)

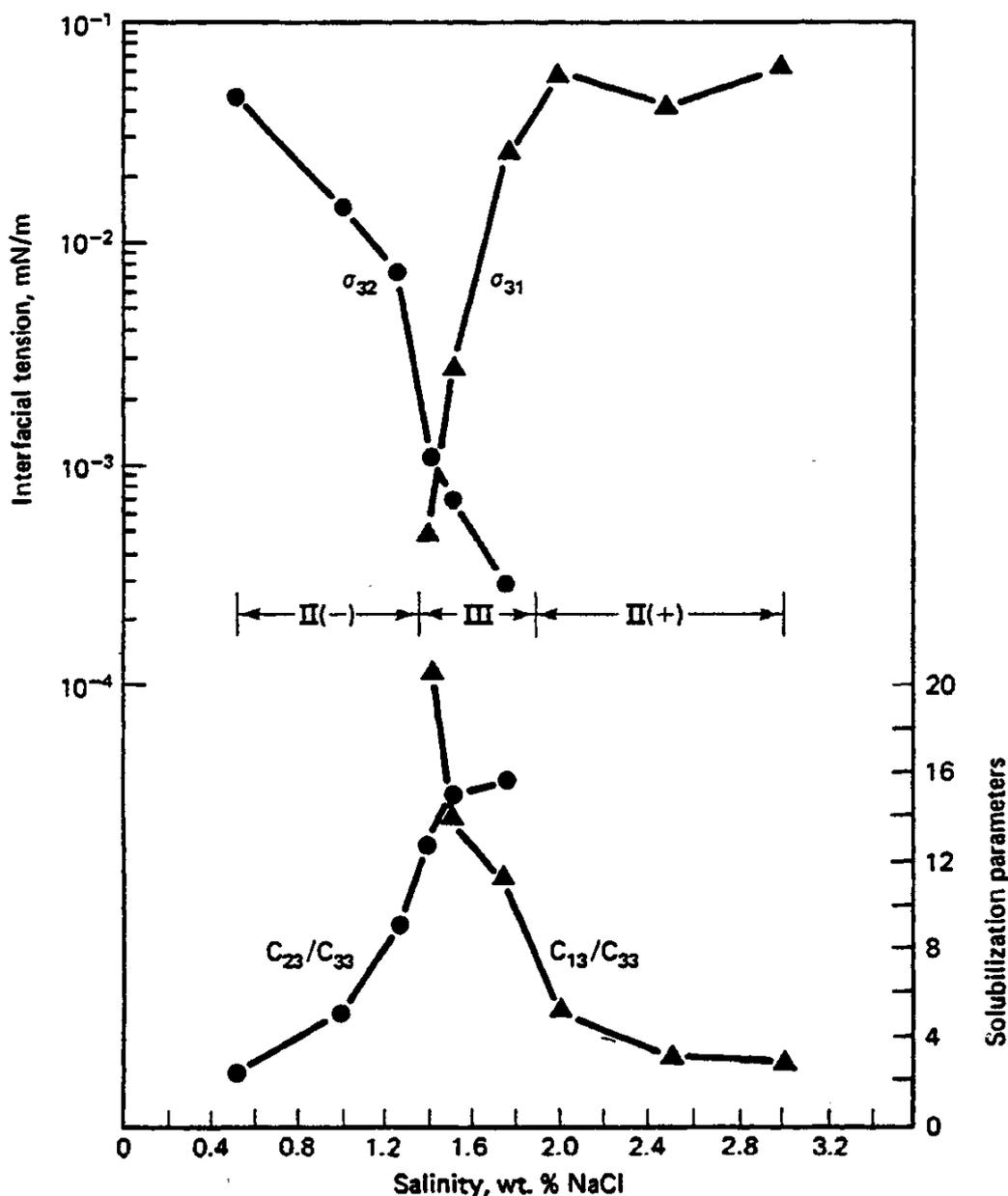


Рис.9-10 Межфазные натяжения и параметры солюбилизации (Рид и Хили, 1977)

Оптимальные минерализации определялись исходя из равных межфазных натяжений, как на Рис 9-10, равных соотношений солюбилизации (Хили и др.,1976), равных краевых углов смачивания (Рид и Хили, 1979) и средней точки C_{Seu} и C_{Sel} . К счастью, все определения оптимальной минерализации дают примерно одну и ту же величину.

Оптимальная минерализация, определяемая по параметрам солюбилизации, так же соответствует минерализации, при которой нефтеотдача в керновом заводнении является максимальной. На Рис. 9-11 представлена эта оптимальная для добычи нефти минерализация. Средняя часть Рис. 9-11 (b) показывает график, аналогичный графику, представленному в верхней части Рис.9-10 для другой системы ПАВ; в нижней части показана нефтеотдача в нескольких керновых заводнениях с постоянной минерализацией. Оптимальная минерализация, определяемая исходя из параметров солюбилизации, межфазных натяжений и нефтеотдачи, хорошо согласуется. Т.к. минерализация, при которой отмечается оптимальное фазовое поведение, и минерализация, при которой отмечается максимальная нефтеотдача, одинаковы, одной из задач разработки мицеллярно-полимерного заводнения является создание этой оптимальной минерализации в присутствии ПАВ.

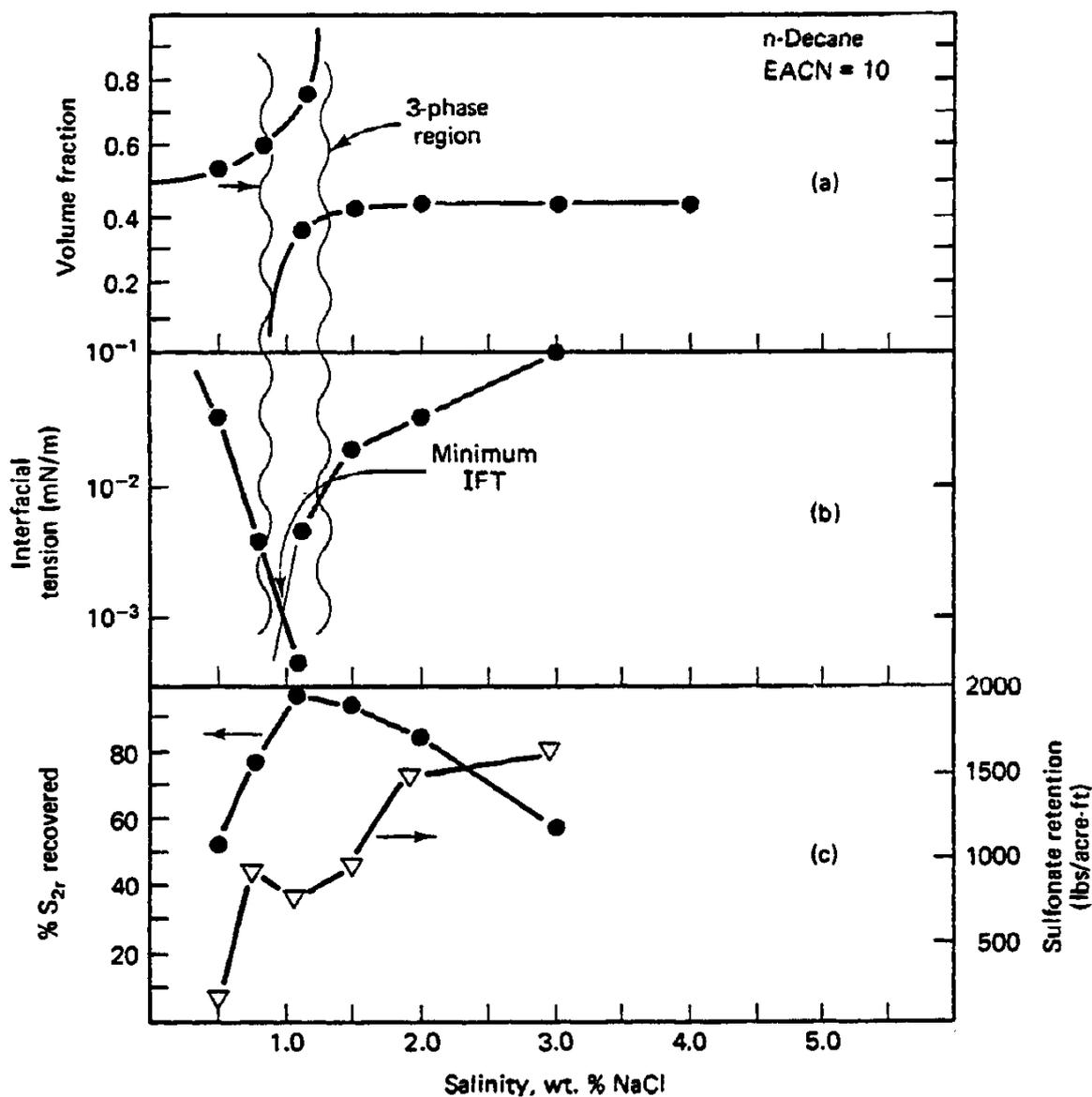


Рис.9-11 Соотношение фазового объема и поведения межфазного натяжения с удерживанием и нефтеотдачей (Глинсманн, 1979)

Оптимальная минерализация не соответствует минимальному удерживанию ПАВ (Рис.9-11с), но это обусловлено эффектами конкурирующих ионов, о чем мы упоминаем ниже.

Из-за эффекта разбавления, упомянутого выше, максимальная нефтеотдача происходит реально там, где комбинация концентраций электролита, ПАВ и содетергента дает максимальные параметры солюбилизации. Следовательно, следует говорить об оптимальных *условиях*, а не об оптимальной минерализации. Термин оптимальная минерализация прочно внедрился в литературе о мицеллярно-полимерных составах, но это точно только для идеального фазового поведения (Рис.9-7). Не путайте оптимальную минерализацию C_{Sopt} – характеристическое свойство комбинации нефть-вода-ПАВ, с преобладающей минерализацией C_{Se} – независимой переменной в разработке мицеллярно-полимерных составов.

Оптимальные минерализации могут сильно меняться в зависимости от характера ПАВ и псевдокомпонентов раствора. Но вызывает беспокойство то, что для многих ПАВ, привлекательных с коммерческой точки зрения, в большинстве пластов, рассматриваемых в качестве кандидатов для мицеллярно-полимерного заводнения, оптимальная минерализация

меньше минерализации пластовой воды. Оптимальные минерализации можно повысить за счет добавления в оторочку любого хирреагента, который повышает растворимость основного ПАВ. Добавление содетергентов в мицеллярно-полимерную оторочку, как правило, увеличивает межфазное натяжение.

Понятие оптимальных условий напрямую связано с фазовым поведением мицеллярно-полимерных систем. Даже свойства мицеллярно-полимерных систем, которые видимо не связаны с фазовым поведением (например, удерживание), являются функциями минерализации, концентрации содетергента и температуры. Это наблюдение приводит к интересному предположению, что *все* мицеллярно-полимерные свойства (удерживание, фазовое поведение, межфазное натяжение, подвижности) связаны с оптимальной минерализацией и, возможно, с параметрами солубилизации.

9-6 Прочие фазовые свойства

Наше понимание мицеллярно-полимерного фазового поведения вытекает из троичного представления последовательности Винзоровского фазового поведения. Известны другие представления, особенного для отображения фазовых свойств.

Очень удобным отображением фазового поведения является *диаграмма доли объема* (Рис.9-12). Представьте точку постоянного общего состава (параллельно оси минерализации) на тройных плоскостях Рис.9-6. Объемы каждой фазы отмечены и представлены кривыми в виде изменения минерализации раствора. Начиная с низкой минерализации, диаграмма доли объема показывает последовательность убывания объема олеиновой фазы и увеличение объема водной фазы при некотором трехфазном наложении в средней части. Если суммарная концентрация ПАВ невелика, а водонефтяное отношение составляет примерно 1, появление водной нижней фазы соответствует приблизительно началу области III типа (C_{Sel}), а исчезновение верхней олеиновой фазы соответствует приблизительно концу области III типа (C_{Seu}). Минерализация, при которой водная и олеиновая фаза имеют равные объемы, является хорошим приближением оптимальной минерализации в том случае, если концентрация ПАВ и содетергента достаточно малы. Сравните диаграмму доли объема на Рис.9-11a и 9-12b.

Изменение минерализации при сохранении других переменных постоянными иногда называют поиском минерализации. Изменение минерализации является наиболее распространенным представлением диаграммы доли объема; однако, иногда бывает полезной производная диаграммы доли объема, в которой вместо минерализации изменяется концентрация содетергента. Для того чтобы свести к минимуму количество измерений, каждый поиск может быть довольно грубым (примерно десять измерений), дополненный более полной информацией для уточнения оценки важных событий.

Конечно, любое фазовое свойство может быть представлено графически вместо фазовых объемов. На Рис.9-13 вязкость микроэмульсионной фазы показана как функция минерализации. В этом диапазоне микроэмульсионная фаза, как определено выше, является сплошной, и показывает максимум вязкости при минерализации, приближающейся к оптимальной. Максимум означает молекулярное упорядочение в фазе, которое, по-видимому, является самым сильным при минерализации фазовой инверсии. Такие максимумы могут быть либо благотворными, если их можно использовать для регулирования подвижности в оторочке, либо вредными, если в результате получаются чрезвычайно вязкие жидкости. Именно для противодействия последней тенденции к мицеллярно-полимерным оторочкам стали добавлять содетергенты. В том же диапазоне минерализаций (Рис.9-13) избыточные вязкости фаз существенно не меняются.

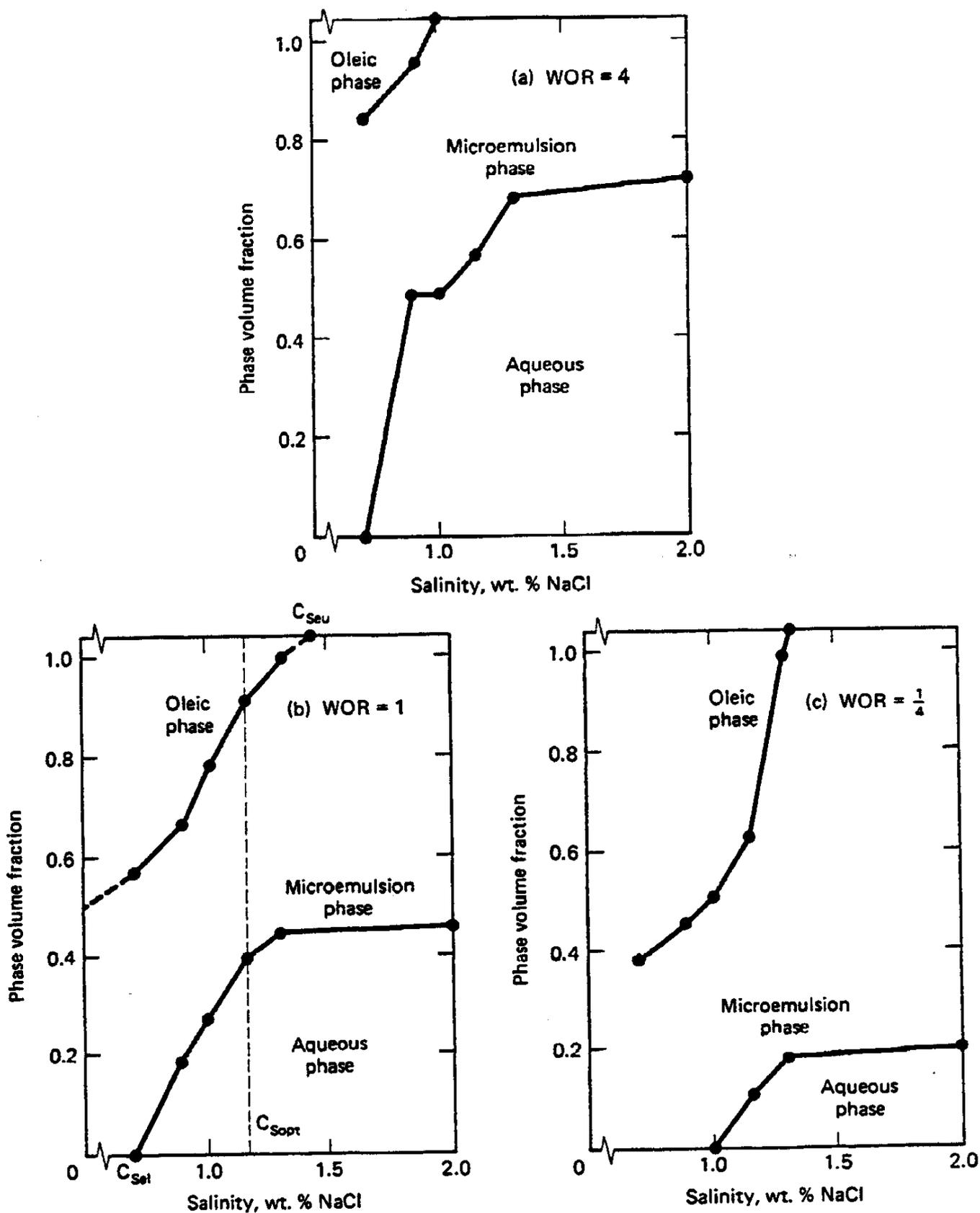


Рис.9-12 Диаграммы фазового объема (поиски минерализации) при трех водонефтяных отношениях (Инглисен, 1981)

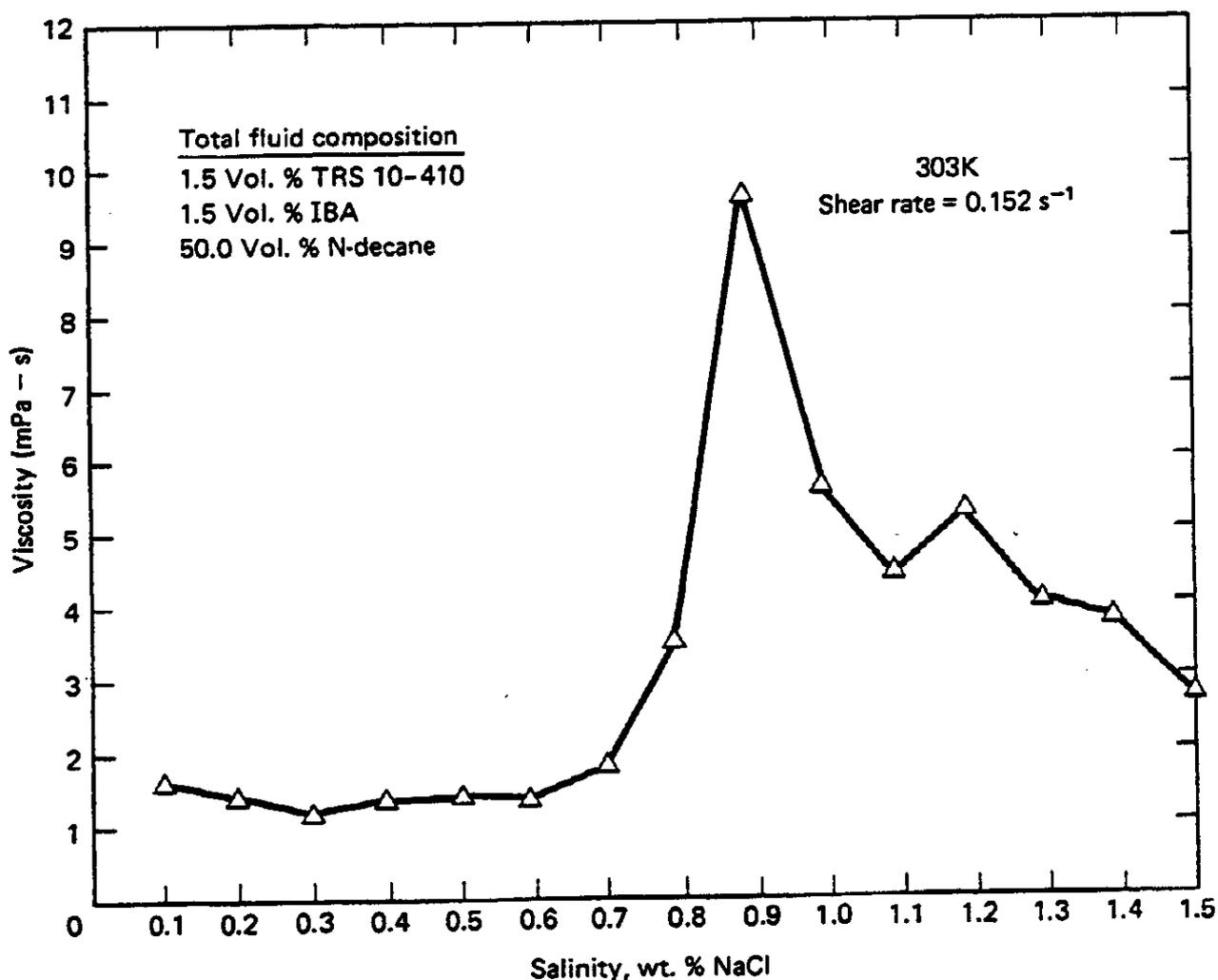


Рис.9-13 Вязкость микроэмульсионной фазы как функция минерализации (Джоунс, 1981)

9-7 Количественное отображение мицеллярных свойств

Прогноз реакции мицеллярно-полимерного состава основан на способности дать количественное отображение вышеупомянутого поведения в уравнениях. Учитывая сложности, на многие из которых мы только ссылались, невозможно вывести всеобъемлющие отображения. В этом разделе мы делаем попытку отразить главные особенности, делая следующие предположения:

1. Все жидкости являются несжимаемыми и идеально смешиваются.
2. Температура не изменяется, и фазовое поведение не чувствительно к давлению. Эти ограничения означают, что фазовое поведение подвержено воздействию только в результате изменений эффективной минерализации C_{Se} .
3. Применяется тройные равновесия, представленные на Рис.9-11. В данный момент мы не учитываем неидеальные эффекты.
4. Верхняя часть бинадальной кривой проходит через минимум вблизи оптимальной минерализации C_{Sopt} . Этот минимум причина того, что оптимальная минерализация, определенная из межфазного натяжения и фазового поведения, одинакова, т.к. параметры солубилизации будут максимальными при C_{Sopt} .

5. Разделение критической рабочей линии по мере образования или исчезновения системы III типа происходит так близко к троичному основанию, что в этих случаях мы можем принять исходные инвариантные точки, совпадающими с левой и правой вершинами.

Мы стремимся найти такое отображение, которое охватывало бы основы мицеллярно-полимерного поведения, и не было бы обременено чрезмерным числом параметров. Такая простота означает, что уравнения используются для описания поведения по возможности в большей степени, и мы выбираем эти уравнения с тем, чтобы иметь небольшое количество регулируемых параметров. Хотя многие из уравнений являются эмпирическими, мы стремимся сделать предельные случаи теоретически точными.

Результаты минерализации

Мы создаем уравнения таким образом, чтобы регулируемые параметры имели физическое значение на ранее описанных диаграммах. Эффективная минерализация, соответствующая переходу систем типа II(-) к системам типа III, C_{SeI} , является приблизительно минерализацией на диаграмме доли объема, где появляется третья микроэмульсионная фаза. C_{SeII} существует там, где микроэмульсионная фаза исчезает. Для наилучшей аппроксимации обеих величин используйте диаграмму доли объема с водонефтяным отношением равным 1. При этом водонефтяном отношении оптимальной минерализацией C_{Sopt} является C_{Se} , где избыточные фазы имеют равные объемы.

В дальнейшем эффективные минерализации нормализуются с помощью C_{Sopt} . Получаемые в результате безразмерные эффективные минерализации

$$S_{SeD} = \frac{C_{Se}}{C_{Sopt}} \quad (9.7-1)$$

это те минерализации, которые регулируют фазовое поведение. Несомненно, C_{SeD} может приобрести любое положительное значение и равна 1 при оптимальных условиях.

Другие результаты, получаемые из диаграммы доли объема, связаны с координатой максимального количества ПАВ на бинодальной кривой при низкой, оптимальной и высокой минерализациях. При $C_{SeD} = 1$ координата ПАВ инвариантной точки представляет собой

$$S_{3M} = \frac{C_3}{S_3} = C_{3max1} \quad (9.7-2)$$

где S_3 – доля объема (насыщенность) микроэмульсионной фазы. Координаты нефти и воды при оптимальных условиях равны

$$C_{1M} = C_{2M} = \frac{1 - C_{3M}}{2} \quad (9.7-3)$$

Эти уравнения предполагают, что избыточные фазы не содержат ПАВ.

При низкой минерализации верхняя часть бинодальной кривой представляет собой

$$C_{3\max 0} = \frac{C_3}{S_3} \Big|_{C_{Sel}} \quad (9.7-4a)$$

а аналогичная величина при высокой минерализации равна

$$C_{3\max 2} = \frac{C_3}{S_3} \Big|_{C_{Seu}} \quad (9.7-4b)$$

Уравнения (9.7-4a) и (9.7-4b) обычно дают занижение вершин бинодальных кривых. На Рис.9-14 представлены величины в уравнениях (9.7-2) и (9.7-4)

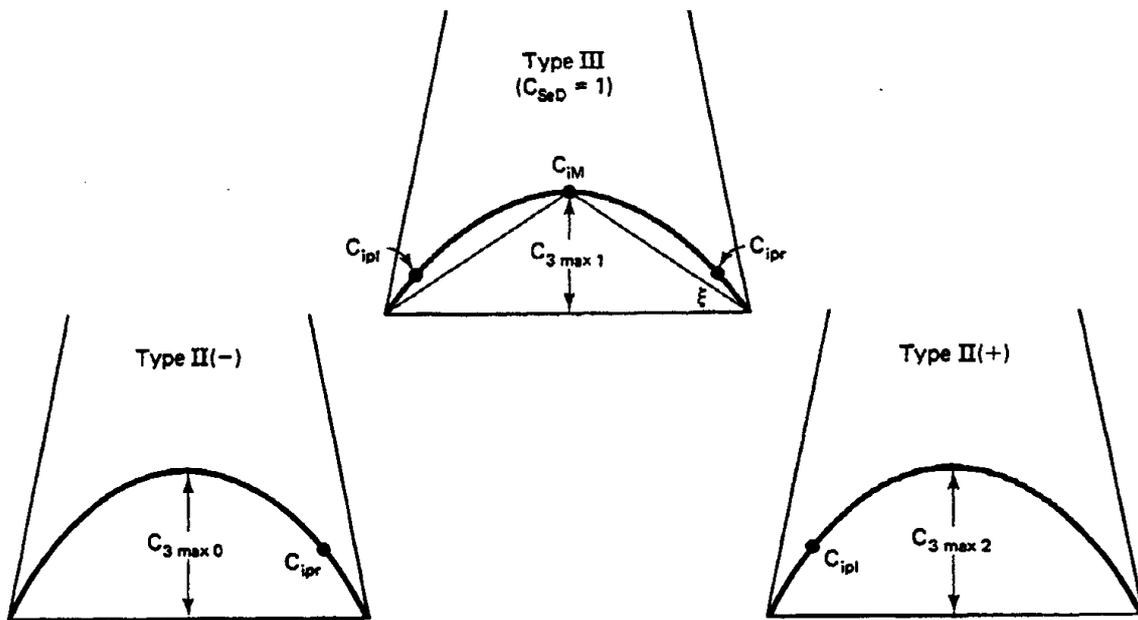


Рис.9-14 Определение величин для отображения фазового поведения

Результаты, не наблюдаемые из диаграмм доли объема, представляют собой места расположения точек полного смешения частично смешивающихся жидкостей. Мы делаем допущение, что координаты нефти в точке полного смешения частично смешивающихся жидкостей изменяются линейно в пределах C_{SeuD} и C_{SelD} , как показано на Рис.9-15. C_{2PL} и C_{2PR} – координаты нефти в левой и правой точке полного смешения частично смешивающихся жидкостей – применимы к системам типа II(-) и II(+), соответственно. Кроме того, Рис.9-15 показывает предполагаемое линейное изменение координаты нефти в инвариантной точке C_{2M} . Верхний индекс * относится к предельным случаям низкой и высокой минерализации. Типичными значениями C_{2PL} и C_{2PR} являются 0.05 и 0.95, соответственно.

Этих семи параметров (C_{SelD} , C_{SeuD} , $C_{3\max 0}$, $C_{3\max 1}$, $C_{3\max 2}$, C_{2PL} и C_{2PR}) достаточно, чтобы определить фазовое поведение при наличии нескольких дополнительных предположений.

Бинодальная кривая

Мы используем тот же формальный подход для отображения бинодальной кривой при всех фазовых окружениях. Для типа III это означает (Рис.9-14), что две двухфазные доли определяются непрерывной кривой.

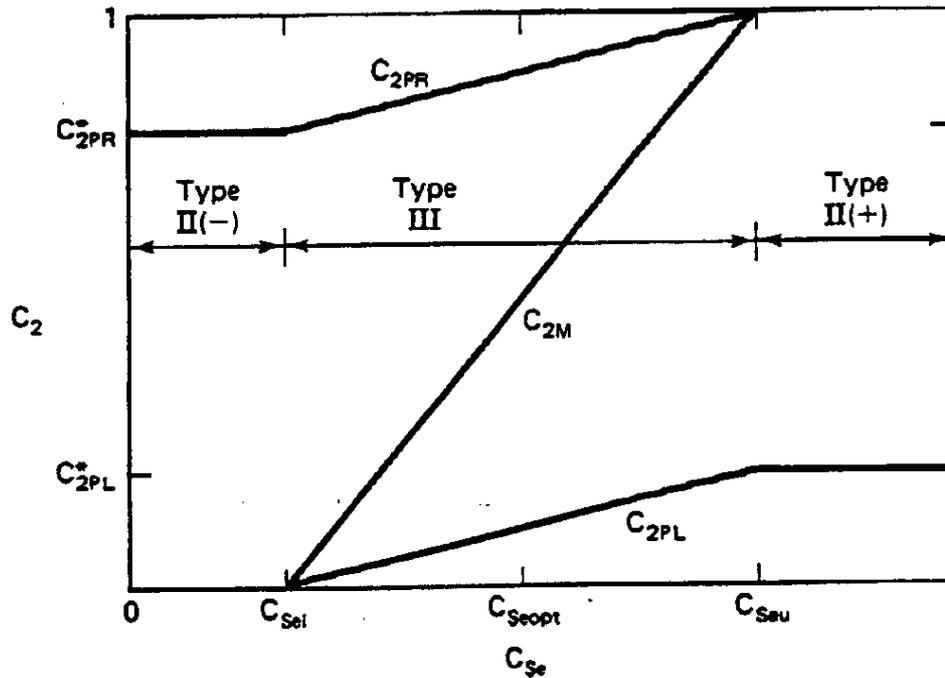


Рис.9-15 Перемещение точки полного смешения частично смешивающихся жидкостей и инвариантной точки с изменением эффективной минерализации

Для упрощения, пусть отображение, полученное Хэндом из уравнения (4.4-23), определяет бинадальную кривую с $V_H = -1$.

$$\frac{C_{3j}}{C_{2j}} = A_H \left(\frac{C_{1j}}{C_{3j}} \right), j = 1, 2 \text{ or } 3 \quad (9.7-5)$$

Уравнение (9.7-5) вынуждает бинадальную кривую быть симметричной. Решая уравнение (9.7-5) для C_{3j} через C_{2j} , получаем (вспомнив, что $C_{1j} + C_{2j} + C_{3j} = 1$)

$$C_{3j} = \frac{1}{2} \left(\left[(C_{2j} A_H)^2 + 4C_{2j} A_H (1 - C_{2j}) \right]^{1/2} - C_{2j} A_H \right) \quad (9.7-6)$$

Т.к. кривая является симметричной, максимальная C_{3j} имеет место, когда $C_{2j} = C_{1j}$ или как вариант, когда $C_{2j} = (1 - C_{3j})/2$, как в уравнении (9.7-3). Эта подстановка в уравнение (9.7-6) дает

$$A_{H_m} = \left(\frac{2C_{3_{\max m}}}{1 - C_{3_{\max m}}} \right)^2 \quad (9.7-7)$$

где $m = 0, 1$ или 2 , в соответствии с предельным значением минерализации. Значения A_{Hm} линейно интерполируются как:

$$A_H = A_{H0} + (A_{H1} - A_{H0}) C_{SeD}, C_{SeD} \leq 1 \quad (9.7-8)$$

$$A_H = A_{H1} + (A_{H2} - A_{H1})(C_{SeD} - 1), C_{SeD} \geq 1$$

Рабочие линии в двухфазных системах

Т.к. трактовка для системы $\Pi(+)$ типа идентична, рассмотрим рабочие линии только в системе $\Pi(-)$ типа, но вместо C_{2PR} используем C_{2PL} . Опять используем отображение, полученное Хэндом, но с $F_H = 1$, фазовое распределение (уравнение 4.4-24) теперь принимает вид:

$$\frac{C_{32}}{C_{22}} = E_H \left(\frac{C_{33}}{C_{13}} \right) \quad (9.7-9)$$

Это уравнение применяется в точке полного смешения частично смешивающихся жидкостей, из которой мы получаем $E_H = C_{1PL}/C_{2PL} = (1 - C_{2PL} - C_{3PL})/C_{2PL}$. Т.к. точка полного смешения частично смешивающихся жидкостей находится также и на бинадальной кривой, уравнение (9.7-6) применимо, в результате чего получаем:

$$E_H = \frac{1 - C_{2PR} - \frac{1}{2} \left[(A_H C_{2PR})^2 + 4A_H C_{2PR} (1 - C_{2PR})^{\frac{1}{2}} - A_H C_{2PR} \right]}{C_{2PR}} \quad (9.7-10)$$

C_{2PR} определяется как функция минерализации; это уравнение и уравнение (9.7-8) дают зависимость E_H от минерализации.

Tun III

Трехфазная область этого окружения не вызывает затруднений, т.к. избыточные фазы являются чистыми по допущению, а состав микроэмульсионной фазы дается координатами инвариантной точки. При заданном значении C_{SeD} , C_{2M} – величина постоянная, а C_{3M} следует из уравнения (9.7-6).

Двухфазные доли вызывают несколько больше беспокойства. И опять, мы рассмотрим лишь долю II(-), т.к. доля II(+) – аналогична. Предположим, что отображение, полученное Хэндом из уравнений (9.7-5) и (9.7-9), применимо к преобразованным концентрациям (обозначенным верхним штрихом), где

$$C'_{2j} = C_{2j} \cos \xi \quad (9.7-11a)$$

$$C'_{3j} = C_{3j} - C_{2j} \tan \xi \quad (9.7-11b)$$

$$C'_{1j} = 1 - C'_{2j} - C'_{3j}, j = 2 \text{ or } 3 \quad (9.7-11c)$$

Угол ξ в этих уравнениях взят из Рис.9-14

$$\tan \xi = \frac{C_{3M}}{C_{1M}} \quad (9.7-12a)$$

или, в качестве альтернативы

$$\sec \xi = \frac{(C_{1M}^2 + C_{3M}^2)^{\frac{1}{2}}}{C_{1M}} \quad (9.7-12b)$$

Эти зависимости позволяют выразить параметр E_H через не преобразованные координаты точки полного смешения частично смешивающихся жидкостей как:

$$E_H = \frac{C'_{1PR}}{C'_{2PR}} \quad (9.7-13)$$

Когда используется зависимость между C_3 и C_2 (уравнение 9.7-6), это дает E_H в виде функции минерализации в доле II(-) типа ($C_{SeI} < C_{Se} < C_{Seu}$). Вы можете проверить, что эти манипуляции для систем III типа непрерывно соединяются с двухфазным окружением.

9-8 Фазовое поведение мицеллярно-полимерных составов, разработанных на основе последних технических достижений

Для идеальных систем ПАВ-вода-нефть фазовые границы и оптимальная минерализация не зависят от минерализации раствора. Это наблюдение означает, что графики зависимости фазовых границ и оптимальной минерализации от суммарной концентрации ПАВ – диаграмма требуемой минерализации – будет состоять из горизонтальных линий. Системы нефтяных сульфонатов обычно не проявляют поведения этого типа (Рис.9-8 или 9-16); однако эта неидеальность может быть объяснена с помощью теории псевдофаз (Хирасаки, 1982; Камиллери и др. , 1987). Эта теория, кроме того, иллюстрирует правильный критерий оптимальных условий, объясняет избирательное распределение содетергента между различными фазами и хорошо подходит к теоретическому формализму предыдущего раздела.

На Рис.9-16(b) представлена трехфазная система III типа с водной наружной средней фазой, а Рис.9-16(a) показывает изображение псевдофаз.

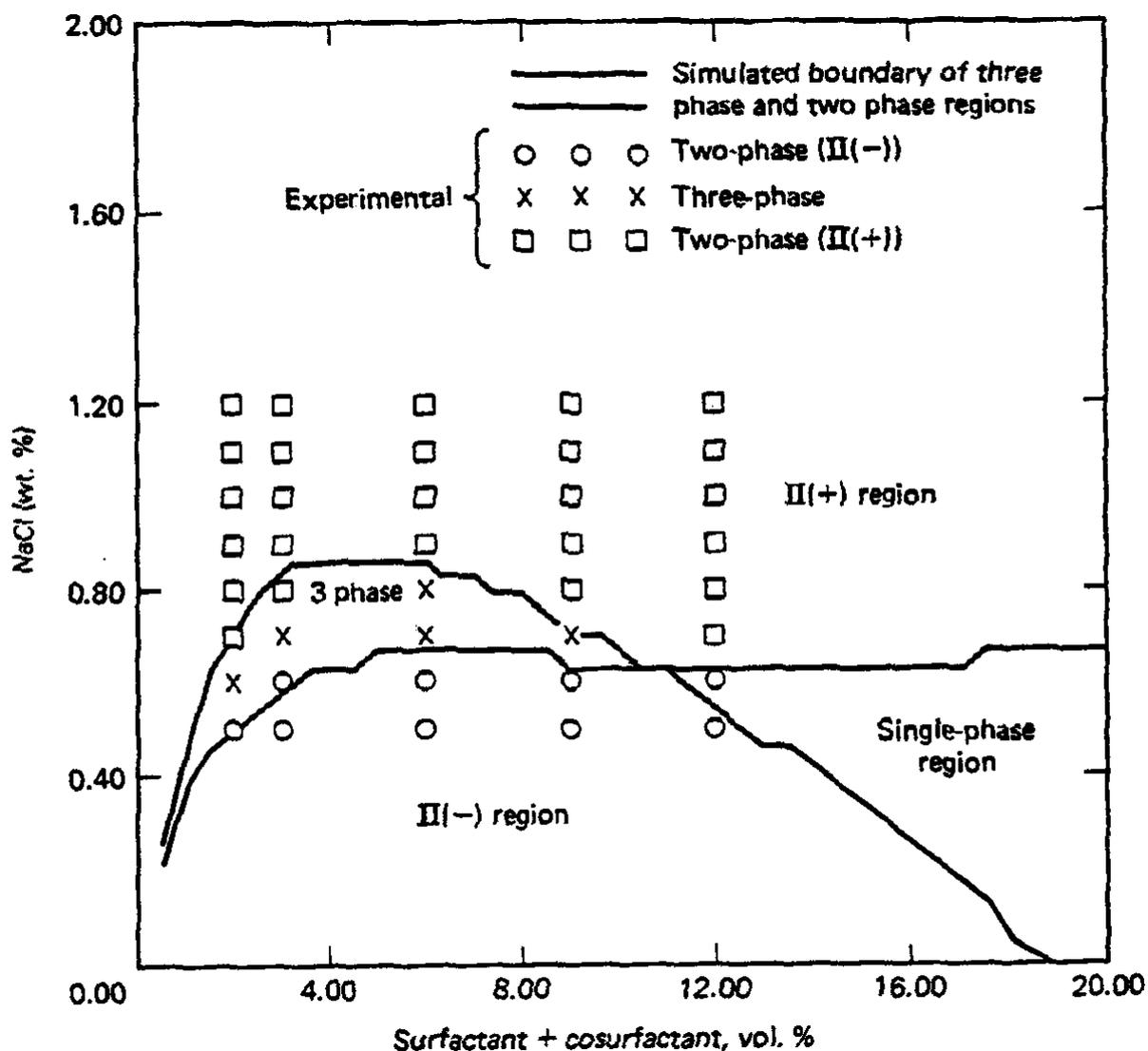


Рис.9-16 Диаграмма требуемой минерализации для соленой воды, декана, изобутанола, TRS 10-410. ПАВ/спирт = 1, Na/Ca = 10 (эквивалентов), водонефтяное отношение = 1 (Праувост, 1984)

Т.к. единственными компонентами системы, занимающими объем, являются вода, нефть, ПАВ и содетергент, система, естественно, представлена на четвертичной диаграмме (Рис.9-16а). Все заряженные виды, за исключением тех, что мы упомянем ниже, существуют в неассоциированной форме. Система состоит из трех псевдокомпонентов:

1. Олеиновый псевдокомпонент, состоящий из избыточной нефтяной фазы и нефти в центре набухших мицелл.
2. Водный псевдокомпонент, состоящий из избыточной водной фазы и воды в микроэмульсии. Эта фаза содержит все заряженные виды, не ассоциированные с мицеллами. Оба, как олеиновый, так и водный псевдокомпонент, могут содержать содетергент, но ни один из них не содержит ПАВ.
3. Межфазный псевдокомпонент, состоящий из ПАВ, содетергента и противоионов, связанных с мицеллами. Мицеллы, содержащие два и более типов ПАВ, являются смешанными мицеллами.

Эта теория имеет три отдельных аспекта: определение эффективной минерализации, распределение содетергента и ассоциация катионов со смешанными мицеллами.

Определение эффективной минерализации

Правило фаз (уравнение 4.1-2) гласит, что при постоянных температуре и давлении для оптимальной системы ПАВ существует две степени свободы ($N_C = 7$, $N_P = 3$, $N_R = 2$). Таким образом, для установления оптимальных условий, должны быть определены две переменные. Правило фаз не дает никакого указания относительно того, какими должны быть две степени свободы, за исключением того, они должны быть интенсивными термодинамическими переменными – замечание, которое исключает суммарные концентрации.

Гловер и др. (1979) приводит экспериментальные данные, которые свидетельствуют о том, что двухвалентные катионы, связанные с мицеллами, являются непосредственным показателем оптимальности. Они свидетельствуют о том, что оптимальная минерализация убывает в линейной зависимости от f_6^3 - доли всех двухвалентных катионов, связанных с мицеллами.

$$\text{Оптимальная минерализация} \sim -\beta_6 f_6^3 \quad (9.8-1)$$

где β_6 – положительная константа. Кроме того, обширные экспериментальные доказательства (Бавир и др., 1981) свидетельствуют о том, что оптимальная минерализация изменяется в линейной зависимости от концентрации содетергента.

$$\text{Оптимальная минерализация} \sim -\beta_7 f_7^3 \quad (9.8-2)$$

где f_7^3 - доля содетергента, связанная с мицеллами. Константа β_7 может быть положительной, если содетергент в большей степени растворим в воде, чем ПАВ, в противном случае, она (константа) может быть отрицательной. Уравнения (9.8-1) и (9.8-2) предлагают следующую комбинацию для оптимальной минерализации, выраженной в виде концентрации анионов в водной фазе:

$$C_{51} = C_{51}^* (1 - \beta_6 f_6^3) (1 + \beta_7 f_7^3) \quad (9.8-3)$$

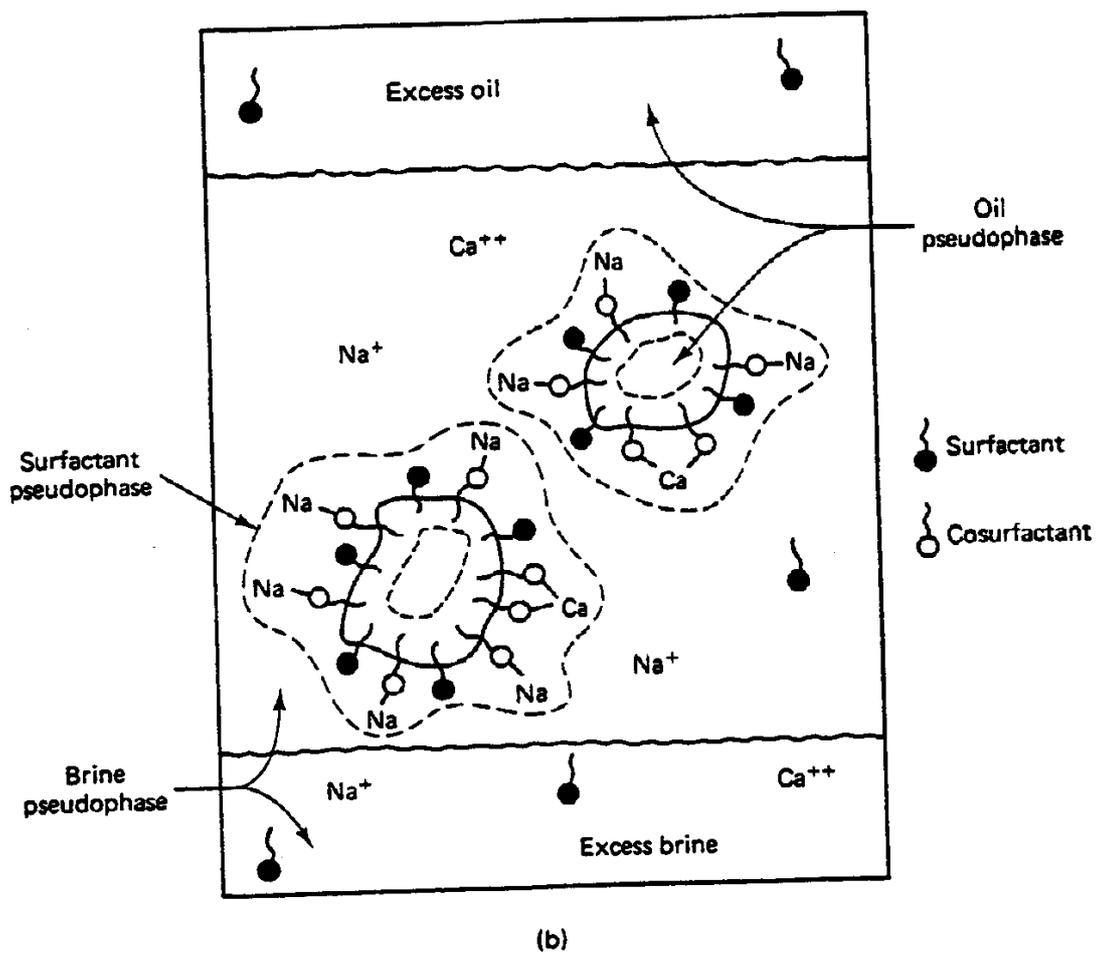
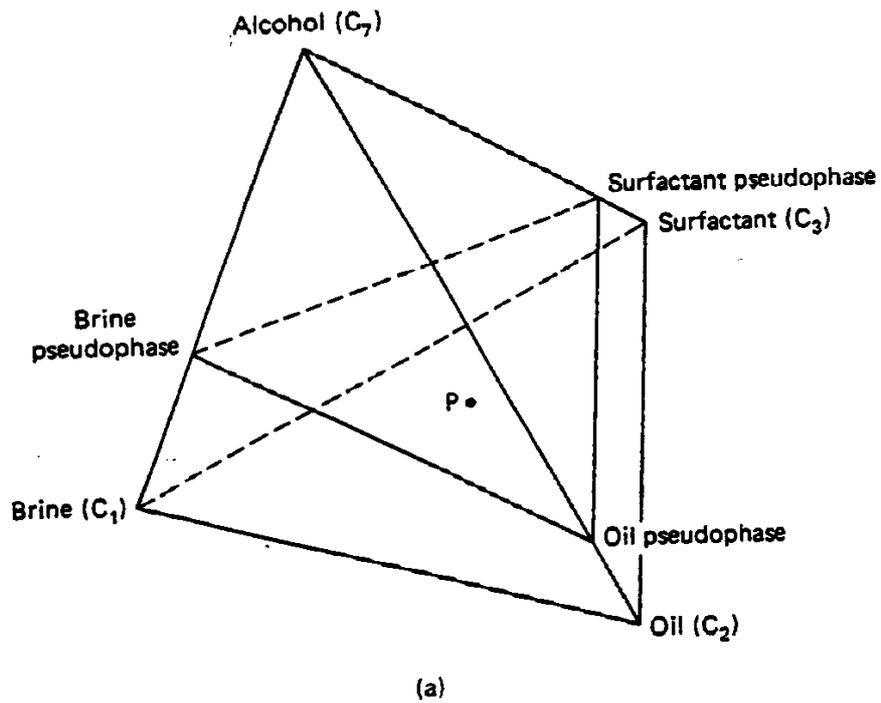


Рис.9-17 Схематическое изображение теории псевдофаз для систем ПАВ-вода-нефть-содетергент

В этом уравнении C_{51}^* является оптимальной концентрацией анионов в отсутствие двухвалентных катионов и содетергентов. Уравнение (9.8-3) предлагает определение эффективной минерализации:

$$C_{Se} = \frac{C_{51}}{(1 - \beta_6 f_6^3)(1 + \beta_7 f_7^3)} \quad (9.8-4)$$

C_{Se} является эффективной минерализацией, используемой в качестве нормирующего множителя в Разделе 9-7. Осталось определить f_6^3 и f_7^3 .

Распределение содетергента

Ниже мы используем C_i^j для обозначения составов псевдофаз. Определим составы псевдокомпонентов в точке Р (C_1, C_2, C_3, C_7) на Рис.9-16(а). Если псевдокомпоненты являются вершинами указанного треугольника, то

$$C_7 = C_1 C_7^1 + C_2 C_7^2 + C_3 C_7^3 \quad (9.8-5)$$

То, что концентрации псевдокомпонентов играют в уравнении роль фазовых насыщенностей, объясняет то, почему теория называется теорией псевдофаз. Теперь используем коэффициенты распределения для исключения двух псевдокомпонентов

$$K_{21}^7 = \frac{C_7^2}{C_7^1}, \quad K_{31}^7 = \frac{C_7^3}{C_7^1} \quad (9.8-6)$$

В идеальном случае коэффициенты распределения должны быть равны коэффициентам распределения содетергентов в отсутствие ПАВ (Прауост, 1984). Эти коэффициенты, при подстановке в уравнение (9.8-6) дают концентрацию содетергента в водной псевдофазе:

$$C_7^1 = C_7 \left(\sum_{j=1}^3 C_j K_{j1}^7 \right)^{-1} \quad (9.8-7a)$$

Т.к. эта псевдофаза содержит только содетергент и воду:

$$C_1^1 = 1 - C_7^1 \quad (9.8-7b)$$

Уравнения (9.8-7b) и (9.8-6) можно использовать для расчета составов всех псевдофаз, исходя из суммарных составов и коэффициентов распределения.

Для того, чтобы использовать уравнения предыдущего раздела, мы должны выразить суммарную и фазовые составы в виде псевдокомпонентов. Мы определяем C_{Pi} как

$$C_{Pi} = \frac{\text{Объем } i + \text{Объем } 7 \text{ ассоциированных с } i}{\text{Общий объем}} \quad (9.8-8)$$

что дает

$$C_{Pi} = C_i(1 + C_7^i), i = 1, 2, 3 \quad (9.8-9)$$

C_{Pi} являются суммарными концентрациями, и должны использоваться непосредственно в строгом троичном представлении. Эти уравнения не подходят к

уравнениям Раздела 9-6 для случаев, когда концентрации содетергента и двухвалентных катионов равны нулю.

Кроме того, уравнение (9.8-9), суммированное по трем фазам, равно единице, исходя из уравнения (9.8-7а).

Непосредственно из этого следует также доля содетергента, связанная с мицеллой. По определению

$$f_7^3 = \frac{\text{Объем } \gamma \text{ в псевдофазе } 3}{\text{Объем псевдофазы } 3} \quad (9.8-10)$$

что просто равно

$$f_7^3 = \frac{1}{1 + \frac{1}{C_7^3}} \quad (9.8-11)$$

также по определению.

Объединение двухвалентных катионов

Конкуренция за анионные места на поверхности мицеллы происходит через электрические силы. Отсюда, применим закон катионообмена в следующем виде:

$$\left(\frac{(C_9^3)^2}{C_6^3} = \beta^3 C_3^3 \frac{(C_9)^2}{C_6} \right)_1 \quad (9.8-12)$$

Это уравнение представляет собой разновидность уравнения (3.5-4), в котором константа $(\beta)^3$ умножается на коэффициент, который преобразует объемную долю C_3^3 в единицы порового объема - мэкв/л³. В уравнение (9.8-12) делается допущение, что содетергент анионный, и все ПАВ-во доступно для обмена.

Теперь применимы два типа электронейтральности: на поверхности мицеллы

$$C_{61}^3 + C_{81}^3 = C_{31} \quad (9.8-13a)$$

и в объемной водной фазе

$$C_{61} + C_{81} = C_{51} \quad (9.8-13b)$$

Они образуют три уравнения с четырьмя неизвестными, из которых можно определить связанные двухвалентные катионы на основе концентраций неассоциированных видов

$$C_{61}^3 = C_{31}^3 + \frac{1}{2} \left[r_{86}^3 - ((r_{86}^3)^2 + 4r_{86}^3 C_{31}^3)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (9.8-14a)$$

где

$$r_{86}^3 = \beta^3 C_3^3 \frac{(C_{81}^3)^2}{C_{61}^3} \quad (9.8-14b)$$

Сравним эти уравнения с уравнением (3.5-7). Так как левая часть уравнения (9.8-14a) известна, доля всех двухвалентных катионов, связанных с мицеллой, следует из

$$f_6^3 = \frac{C_6^3}{C_3} \quad (9.8-15)$$

и C_{Se} можно определить из уравнения (9.7-3).

Вышеприведенная теория очень хорошо подойдет к экспериментальным данным. Рис.9-17 показывает соответствие между определенными и расчетными фазовыми границами для системы нефтяного сульфоната, декана, изобутанола, Na и Ca.

9-9 Относительные проницаемости при высоком капиллярном числе

Свойство переноса, которое заслуживает рассмотрения в отдельном разделе, представляет собой относительную проницаемость при высоком капиллярном числе. В этом разделе мы рассмотрим экспериментальные результаты, полученные с двух- и трехфазной системами, исходя из работы Далшада и др. (1987), (см. Раздел 3-3, где мы обсуждали вопрос относительных проницаемостей при низком капиллярном числе).

Для относительных проницаемостей в целом существует очень мало теоретических зависимостей, еще меньше – для относительных проницаемостей при высоком капиллярном числе. Мы знаем, что предельные значения функций относительных проницаемостей встречаются при остаточных фазовых насыщениях. Последние являются функциями капиллярного числа N_∞ через кривую капиллярного осушения (см. Раздел 3-4). Далее, при очень больших значениях N_∞ мы предполагаем, что относительные проницаемости стремятся к прямолинейным функциям в пределах от 0 до 1 при отсутствии остаточных фазовых насыщений. При низких значениях N_∞ относительные проницаемости должны вернуться функциям, которые имеют место при высоком межфазном натяжении в условиях двух- или трехфазной системы. Изменения между этими крайними значениями выявлены недостаточно хорошо.

Относительные проницаемости при высоком N_∞ замерить трудно. При одном типе опытов большое N_∞ может быть достигнуто за счет увеличения скорости течения. При этом методе опыты должны протекать быстро, т.к., как мы видели в Разделе 3-4, N_∞ должно возрасти в несколько десятков раз, прежде, чем будет получен заметный результат. Такие высокие скорости, несомненно, не характерны для обычных скоростей течения пластовых жидкостей. Если установить высокое N_∞ за счет снижения межфазного натяжения, в опытах будут доминировать изменения, характерные для переходных составов. В принципе, эти переходные состояния можно было бы проанализировать с помощью методов, приведенных в Разделе 9-10, но для этого потребуется знание относительных проницаемостей, измерение которых и является задачей опыта.

Наиболее надежным методом является измерение относительных проницаемостей при установившемся режиме с использованием для этого предварительно уравновешенных жидкостей. Для мицеллярных жидкостей в условиях двухфазного потока, это заключается в вытеснении какого-то состава на одном конце рабочей линии другим составом на той же рабочей линии, при постоянной минерализации. Когда выходящий и закачиваемый потоки будут равны, и переходные состояния, обусловленные неидеальным фазовым поведением, пройдут, относительную проницаемость для текущих фаз можно рассчитать, замерив перепад давления и доли фаз в выходящем потоке. Подобное условие существует в трехфазных идеальных системах, где все составы находятся в равновесии при постоянной минерализации. Конечно, для того, чтобы такие переходные состояния прошли, может потребоваться какое-то время; поэтому, для экспериментов, проводимых в условиях установившегося режима, требуется время. Равномерные насыщения, устанавливаемые в

результате такой процедуры, следуют из материального баланса, а лучше – из данных применения трассера, обработанных на подходящей числовой модели (Делшад и др., 1987).

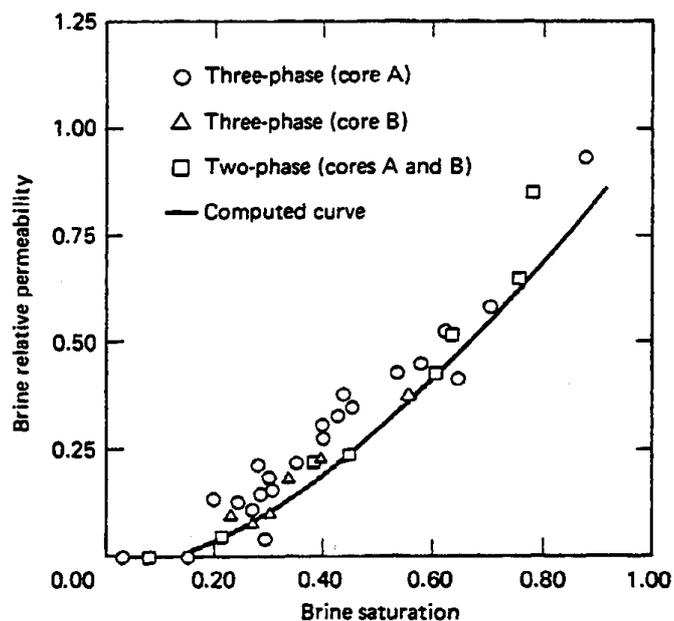
Несмотря на эти трудности, относительные проницаемости при высоком N_{∞} в условиях двухфазного потока интенсивно замерялись, но данные для трехфазных систем немногочисленны. На Рис.9-18 представлены относительные проницаемости при установившемся режиме для воды, нефти и микроэмульсионной фазы в условиях как двух-, так и трехфазного потока. В условиях высокого N_{∞} в обоих ядрах – А и В - проницаемая среда была сильно гидрофильной. $N_{vc} = 0.01$ при оптимальной минерализации, применявшейся в экспериментах. Испытуемая мицеллярная система точно следовала идеальному фазовому поведению. На основании этих данных высокого N_{∞} можно сказать следующее:

1. Остаточные фазовые насыщенности не равны 0. Конечно, эти величины представляют собой точки на кривой капиллярного осушения. За исключением олеиновой фазы, конечная точка которой была уже высокой в гидрофильной среде, относительные проницаемости в конечной точке значительно отличаются от проницаемостей при низком N_{∞} .
2. Относительные проницаемости при высоком N_{∞} не являются прямыми линиями. Кривые на этих рисунках – это соответствие экспоненциальных форм уравнения (3.3-4) данным. Но показатели степени n_1 и n_2 в этих уравнениях не сильно отличаются от тех же значений при низком N_{∞} .
3. Данные, полученные в условиях двух- и трехфазного потока, следуют, по существу, одним и тем же кривым.
4. Относительные проницаемости для всех трех фаз являются функциями своих собственных насыщенностей. При высоком N_{∞} это наблюдение не согласуется с поведением трехфазных потоков газа, нефти и воды (Стоун, 1970).
5. Вероятно, наиболее удивительный вывод заключается в том, что избыточная фаза минерализованной воды не была наиболее сильно смачивающей фазой, как это было в условиях низкого N_{∞} . Это наблюдение подтверждается множеством наблюдений, не представленных на Рис.9-17. Однако остаточные фазовые насыщенности для микроэмульсионной и избыточной водной фазы при $N_{\infty} = 0.01$ имеют почти одну и ту же величину.
6. Форма кривой микроэмульсии вогнута вниз. Это наблюдение совсем нетипично для относительных проницаемостей, и может быть объяснено только проскальзыванием в пристенной области или на границе раздела.

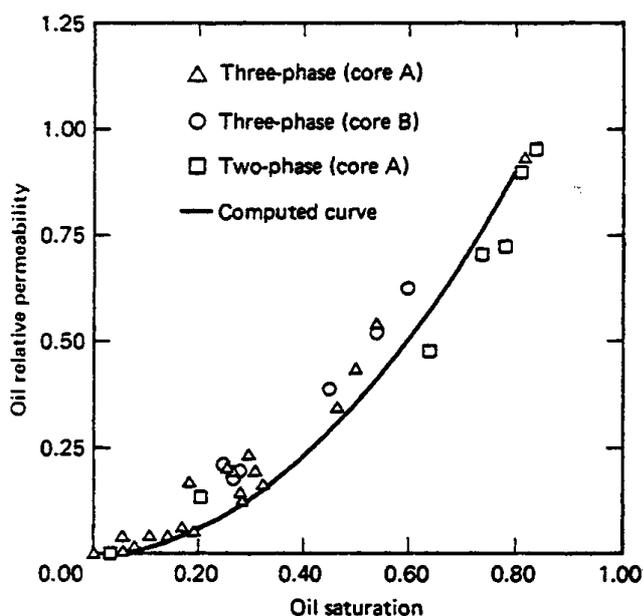
Для приближенного расчета пусть экспоненциальные относительные проницаемости уравнения (3.3-4) будут примерно соответствовать двухфазному поведению в условиях высокого N_{∞} . Предположим, что кривая капиллярного осушения системы II(-) типа представлена на Рис.3-19, с $(N_{vc})_c$ и $(N_{vc})_t$, которые соответствуют смачивающему состоянию фазы j . Мы можем определить интерполянты для конечных точек и кривизны. Например, конечные точки изменяются согласно следующему:

$$(k_{r2}^0)' = (k_{r2}^0) + \left(1 - \frac{S'_{3r}}{S_{3r}}\right)(1 - k_{r2}^0) \quad (9.9-1a)$$

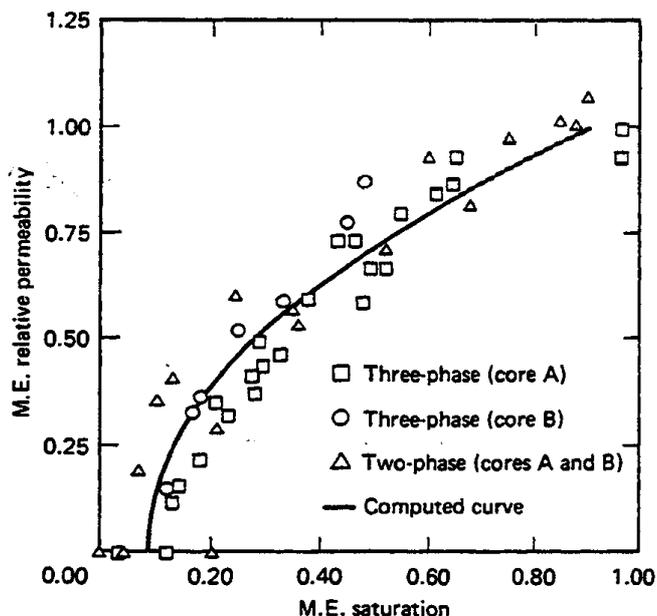
$$(k_{r3}^0)' = (k_{r3}^0) + \frac{S'_{2r}}{S_{2r}}(1 - k_{r3}^0) \quad (9.9-1b)$$



(a) Избыточная водная фаза



(b) Избыточная нефтяная фаза



(c) Микроэмульсионная фаза

Рис.9-18 Относительные проницаемости в условиях двух- и трехфазного потока (Делшад и др., 1987)

где S'_{2r} и S'_{3r} являются остаточными фазовыми насыщенностями при высоком N_{vc} . Эта приближенная линейная зависимость была подтверждена Стегемайером (1976). Неединичная кривизна относительных проницаемостей, по-видимому, сохраняется вне точки нулевых остаточных фазовых насыщенностей; поэтому использование самого логарифма N_{vc} в виде интерполирующей функции кажется обоснованным

$$n'_j = n_j + (1 - n_j) \log \left[\frac{N_{vc}}{(N_{vc})_c} \right], j = 2 \text{ or } 3 \quad (9.9-2)$$

Зависимости для систем II(+) типа, где $j = 1$ или 3 , подчиняются аналогичным аргументам.

Теперь мы можем оценить относительные проницаемости в условиях двухфазного потока, исходя из фазового поведения, корреляции параметров солубилизации, кривых капиллярного осушения и кривых относительной проницаемости при низком N_{vc} . Предположим, что мы знаем общий состав системы II(-) типа, которая разделяется на две равновесные фазы. Фазовые составы подчиняются тройной диаграмме. Они могут быть преобразованы до параметров солубилизации с помощью уравнения (9.4-1) и затем в межфазные натяжения за счет применения соответствующих корреляций. Мы используем это для того, чтобы рассчитать N_{vc} , и используем кривые капиллярного осушения для того, чтобы оценить остаточные фазовые насыщенности. Кривые относительных проницаемостей при высоком N_{vc} следуют из уравнений (9.9-1) и (9.9-2). Если имеются дополнительные данные по вязкостям, углам падения и плотностям, мы легко можем рассчитать движение отдельных фаз в многофазовом потоке.

Для трехфазного потока даже такие грубые оценки не гарантированы. Теоретические модели Хирасаки и др. (1983) и Делшада и др. (1987), хотя и являются приемлемыми в ограниченных случаях, не учитывают ни промежуточного смачивания избыточной водной фазы, ни того, что фазовые относительные проницаемости являются функциями только их собственных насыщенностей. Несомненно, нам не достает понимания характера течения в условиях высокого капиллярного числа на поровом уровне.

9-10 Теория движения отдельных фаз в многофазовом потоке применительно к заводнениям мицеллярно-полимерными составами

Теория движения отдельных фаз в многофазовом потоке может помочь разобраться в сущности мицеллярно-полимерных заводнений также, как и в случае вытеснений нефти растворителями и полимерами, рассмотренными в Разделах 7-7 и 8-4. Фактически в этих процессах так много сходства, что мы собрали очень много материала по этим разделам.

Чтобы сделать анализ, мы сделали обычные допущения для движения отдельных фаз в многофазовом потоке: несжимаемая жидкость и порода, одномерный поток и отсутствие рассеивающих эффектов. Кроме того, мы не учитываем наличие полимерного вытеснения (обработку полимером можно добавить в качестве примера), предполагаем трехкомпонентные мицеллярно-полимерные заводнения со ступенчатым изменением концентрации в начале диаграммы время – расстояние и рассматриваем только заводнения, в которых присутствует окружение с постоянным фазовым поведением. Далее, в этом разделе мы до последнего не учитываем удерживание ПАВ, и лишь в последний момент мы применяем более ограничивающий допущения относительно фазового поведения. Для краткости мы рассмотрим только заводнения в условиях высокой минерализации с применением систем II(+) типа. Трактовка движения отдельных фаз в многофазовом потоке применительно к трехфазным мицеллярно-полимерным заводнениям не была широко исследована (Гиордано и Солтер, 1984), но она могла бы быть так же обработана с помощью численного метода, описанного в Разделе 5-7.

Ориентиры тройных диаграмм

На Рис.9-19(a) показан основной характер фазового поведения и насыщенности. Он очень напоминает поведение, показанное на Рис.7-31, за исключением того, что граница

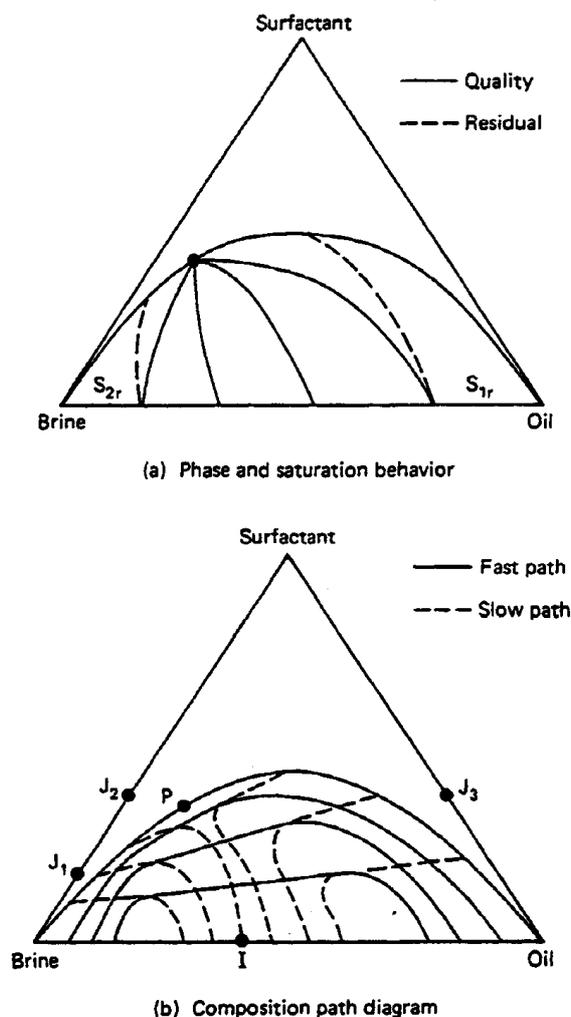


Рис.9-19 Тройная диаграмма и траектории состава для мицеллярно-полимерной системы

растворимости проходит через весь нижний край тройной диаграммы, и, конечно, вода явно присутствует на диаграмме. Все фазовые диаграммы в этом разделе имеют явно выраженные двухфазные области. Одно существенное отличие от вытеснения растворителем заключается в том, что линии остаточной насыщенности олеиновой и водной фаз сливаются с бинодальной кривой на некотором расстоянии от точки полного смешения частично смешивающихся жидкостей. Это происходит потому, что по мере достижения точки полного смешения частично смешивающихся жидкостей, капиллярное число на границе раздела олеиновой – водной фаз быстро возрастает (межфазное натяжение уменьшается), что заставляет S_{2r} и S_{1r} стремиться к нулю (см. Раздел 3-4). При непрерывной закачке ПАВ, как мы рассматриваем здесь, этот вопрос имеет второстепенное значение. Но при применении оторочек, имеющих конечный размер, при рассеивающихся вытеснениях – т.е. в реальных ситуациях – скорость приближения к нулю S_{2r} имеет очень большое значение. Кривая движения водной и олеиновой фаз следует из относительных проницаемостей в условиях большого капиллярного числа N_{vc} , что мы рассматривали в Разделе 9-9.

Мицеллярно-полимерное заводнение без удерживания

Характер относительной проницаемости не затрагивает качественных особенностей диаграммы траектории состава (Рис.9-19b). Вывод, сделанный в Разделе 7-7, можно применять напрямую: Мы видим наличие быстрых траекторий «шпилек» вдоль рабочих

линий, медленных траекторий по обеим сторонам и последовательность на траекториях нерабочих линий. Благодаря графическим возможностям мы получаем распределение компонентов между фазами в виде семейства прямых линий, пересекающихся при $C_3 = 0$ и $C_2 = C_2^0$ (огнибающая рабочих линий является точкой на оси C_3)

$$C_{3j} = \eta(C_{2j} - C_2^0), j = 2 \text{ or } 3 \quad (9.10-1)$$

откуда мы получаем $C_1^0 = 1 - C_2^0$. Параметр η является углом наклона линии распределения фаз.

Для краткой проверки предпримем следующее: скорости компонентов вдоль рабочей линии равны

$$v_{C_i} = \frac{dF_i}{dC_i}, i = 1, 2, 3 \quad (9.10-2)$$

Траектории нерабочих линий несут постоянные удельные скорости, определяемые как

$$v_{\Delta C_i} = \frac{F_i - C_i^0}{C_i - C_i^0}, i = 1, 2, 3 \quad (9.10-3)$$

В касательной точке пересечения траекторий рабочих и нерабочих линий мы должны получить

$$\frac{F_i - C_i^0}{C_i - C_i^0} = \frac{dF_i}{dC_i} \quad (9.10-4)$$

что определяет две особые кривые и позволяет определить место соответствующего построения на графике движения отдельных фаз – общей концентрации. Другие траектории включают в себя саму бинодальную кривую и кривую эквивалентных скоростей, где $f_1 = S_1$.

На Рис.9-19(b) мы показываем поведение кривых движения отдельных потоков, чья S-образная форма остается даже до низкого межфазного натяжения. Наша задача – соединить траектории таким образом, чтобы траектория состава привела к монотонно убывающим скоростям состава.

Сосредоточимся на трех разных условиях закачки. Условие J_1 – водный (не содержащий нефти) раствор ПАВ ниже продления критической рабочей линии, J_2 – водный раствор ПАВ над продлением и J_3 – олеиновая (не содержащая воды) оторочка ниже продления рабочей линии. Условия J_1 и J_2 представляют водные растворы ПАВ низкой и высокой концентрации, а условие J_3 – раствор, растворимый в нефти. В каждом случае начальное условие будет при I – стандартное третичное условие.

На Рис.9-20 показаны траектория состава и профили S_2 и C_3 при постоянном t_D в условиях вытеснения ПАВ низкой концентрации. Начиная с условия закачки, траектория состава входит в двухфазную область вдоль продления рабочей линии, переходит на траекторию нерабочей линии во второй особой точке на рабочей линии, переходит опять на быструю траекторию вдоль основания тройной диаграммы и затем – к начальному условию I. У типичных кривых движения отдельных потоков это вызывает импульс до насыщенности нефтяного вала S_{2B} , а смешанная волна от S_{2B} до $S_2 = 0$. Движение по рабочей линии обуславливает любопытный эффект, заключающийся в том, что последующая концентрация ПАВ может быть больше закачанной концентрации. Вытеснение может быть также относительно не эффективным, если растекающаяся часть задней части нефтяного вала велика.

В условиях вытеснения ПАВ большой концентрации (Рис.9-21) траектория состава проходит через точку полного смешения частично смешивающихся жидкостей, следует по траектории эквивалентных скоростей до насыщения нефтяного вала, и затем – к начальному условию.

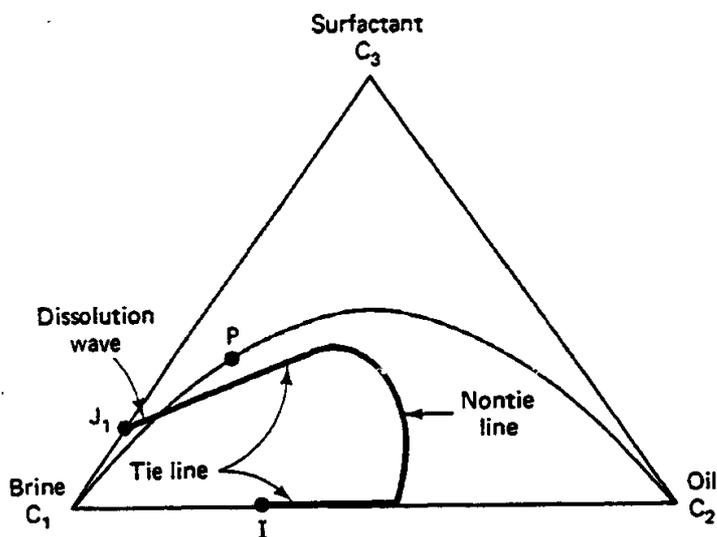
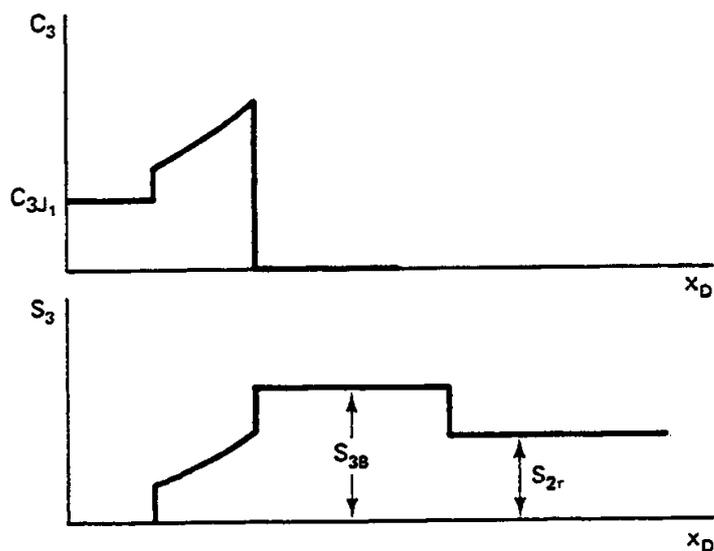


Рис.9-20 Траектория и профили состава в условиях вытеснения ПАВ низкой концентрации

Это вытеснение подобно смешивающемуся вытеснению при газонапорном режиме, т.к. волна ПАВ незначительна и движется с единичной удельной скоростью (сравните это вытеснение с нижним фрагментом Рис.7-35b). Как таковое, это вытеснение очень эффективно, однако, более высокая эффективность достигается за счет более высокой концентрации ПАВ. К тому же, насыщенность нефтяного вала несколько ниже, чем на Рис.9-20.

Поведение олеинового ПАВ показано на Рис.9-22. Здесь траектория состава также входит вдоль продления рабочей линии, разветвляется на траекторию нерабочей линии в первой особой точке, а затем - до нефтяного вала и начального условия. Во многих отношениях это вытеснение является зеркальным отражением вытеснения, представленного на Рис.9-20. Однако, предельная насыщенность микроэмульсионной фазы равна единице, что означает, что насыщенность нефтяного вала S_{2B} составляет нечто среднее между начальной величиной и 1.0. В этом вытеснении концентрация ПАВ убывает монотонно, что, как и на Рис.9-20, может быть также неэффективным.

Существует большое разнообразие характеров вытеснения даже при ограничивающих допущениях, задействованных здесь. Некоторые из них присутствуют в построениях,

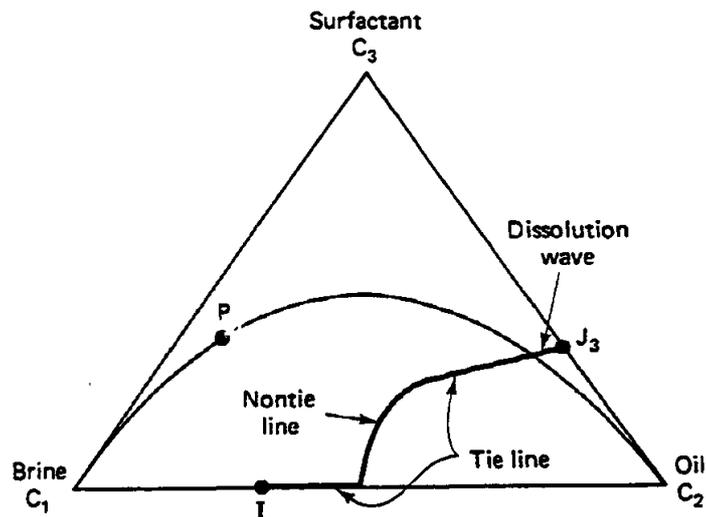
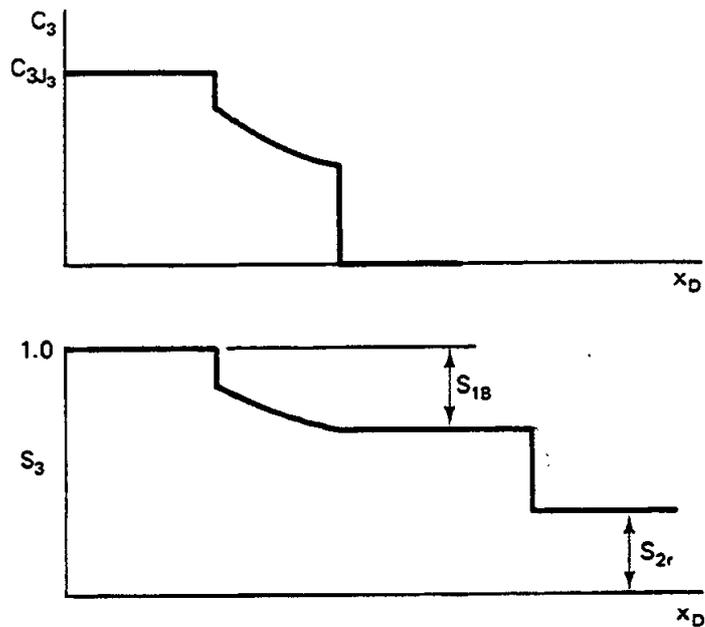


Рис.9-21 Траектория и профили состава в условиях вытеснения ПАВ высокой концентрации

использовавшихся для представления Рис.9-20 – 9-23. Случаи для систем II(-) типа аналогичны. Характер траектории состава не изменяется с изменением формы кривой движения отдельных потоков, даже если последняя заметно влияет на эффективность вытеснения.

Мицеллярно-полимерное заводнение при наличии удерживания

Добавление удерживания усложняет анализ, т.к. траектория состава более не следует за рабочими линиями. Но сделав несколько дополнительных допущений, мы можем получить решение движения отдельных фаз в многофазовом потоке, в котором используются кривые изменения доли фазы в многофазном потоке, а не движение отдельных потоков.

Проанализируем систему II(-) типа, где правая точка полного смешения частично смешивающихся жидкостей находится в нефтяном углу тройной диаграммы, а количество солубилизированной нефти в микроэмульсионной фазе незначительно. Водная и микроэмульсионная фазы теперь равны ($S_1 = S_3$). Если состав закачиваемой оторочки находится ниже касательной, проведенной от бинадальной кривой в точке полного

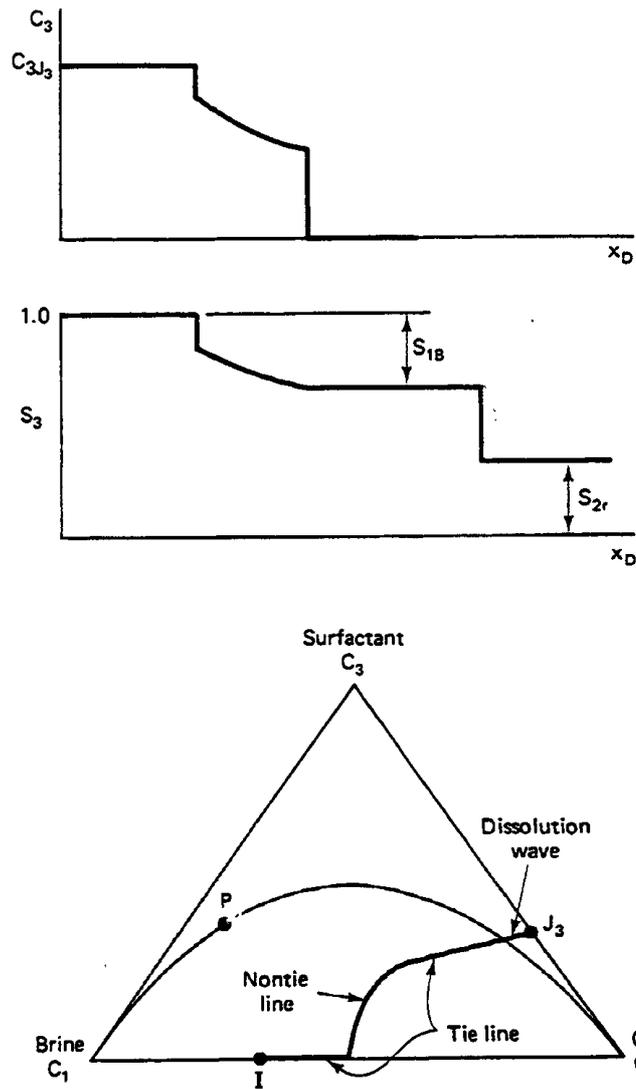


Рис.9-22 Траектория и профили состава в условиях вытеснения олеиновым ПАВ высокой концентрации

смешения частично смешивающихся жидкостей, она обязательно должна быть на рабочей линии, даже если она не содержит нефти. Пусть остаточная нефтенасыщенность на этой рабочей линии будет равна S'_{2r} , предельная величина кривой движения водной фазы при низком межфазном натяжении (при высоком N_{vc}) - как показано на Рис.9-24. Этот рисунок также показывает кривую движения воды и нефти f_1 вдоль рабочей линии на основании тройной диаграммы. Т.к. эта водная оторочка смешивающимся образом вытесняет остаточную воду, скорость соответствующей индифферентной волны равна

$$v_{C_3} = \frac{f_1^s}{S_1 + D_3} \quad (9.10-5)$$

исходя из уравнения (5.4-8а). Отметим, что f_1^s - движение микроэмульсионной (водной) фазы при высоком N_{vc} . В этом уравнении D_3 - потеря ПАВ на фронте продвижения, определяемая как

$$D_3 = \frac{1-\phi}{\phi} \cdot \frac{C_{3s}}{C_{3J} \rho_s} \quad (9.10-6)$$

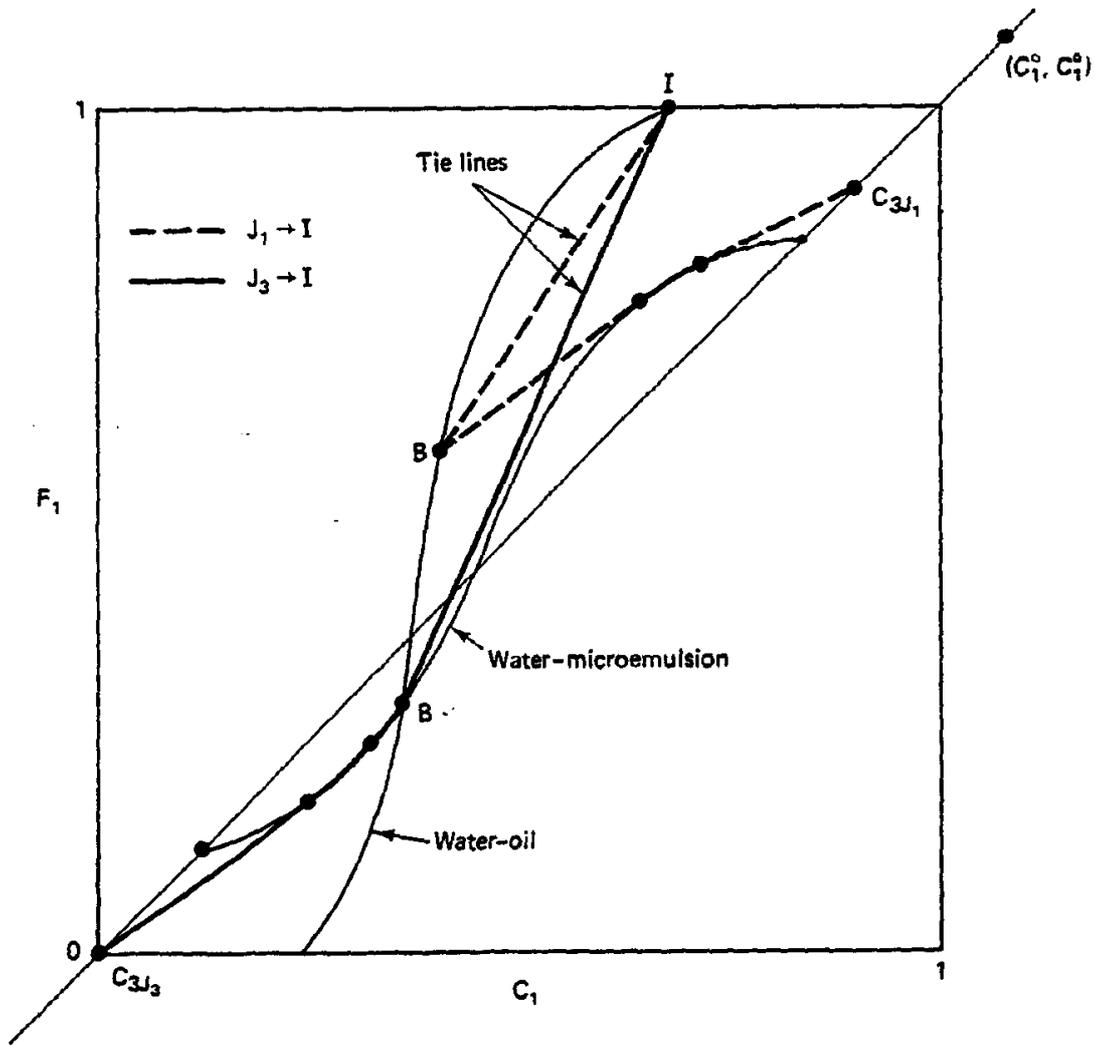


Рис.9-23 Движение отдельных потоков и траектории состава в условиях вытеснения водным и олеиновым ПАВ

Случай наиболее общего характера возникает, когда задняя часть нефтяного вала продвигается в виде смешанной волны. На переднем крае растекающейся части этой волны удельная скорость (уравнение 9.10-5) должна быть равна удельной скорости нефти при некоей насыщенности S_1^* , которая неявно дается как

$$\left(\frac{df_1^s}{dS_1} = \frac{f_1^s}{S_1 + D_3} \right)_{S_1^*} \quad (9.10-7)$$

Удельная скорость импульса в задней части нефтяного вала равна

$$v_{\Delta C_2} = \frac{f_{2B} - f_2^S(S_2^*)}{S_{2B} - S_2^*} \quad (9.10-8)$$

Она должна быть равна v_{C_3} , оцененной при $S_2^* = 1 - S_1^*$. Если фронт нефтяного вала представляет собой импульс, он проходит со скоростью, определяемой как

$$v_{\Delta C_2} = \frac{f_{2B} - f_{2I}}{S_{2B} - S_{2I}} \quad (9.10-9)$$

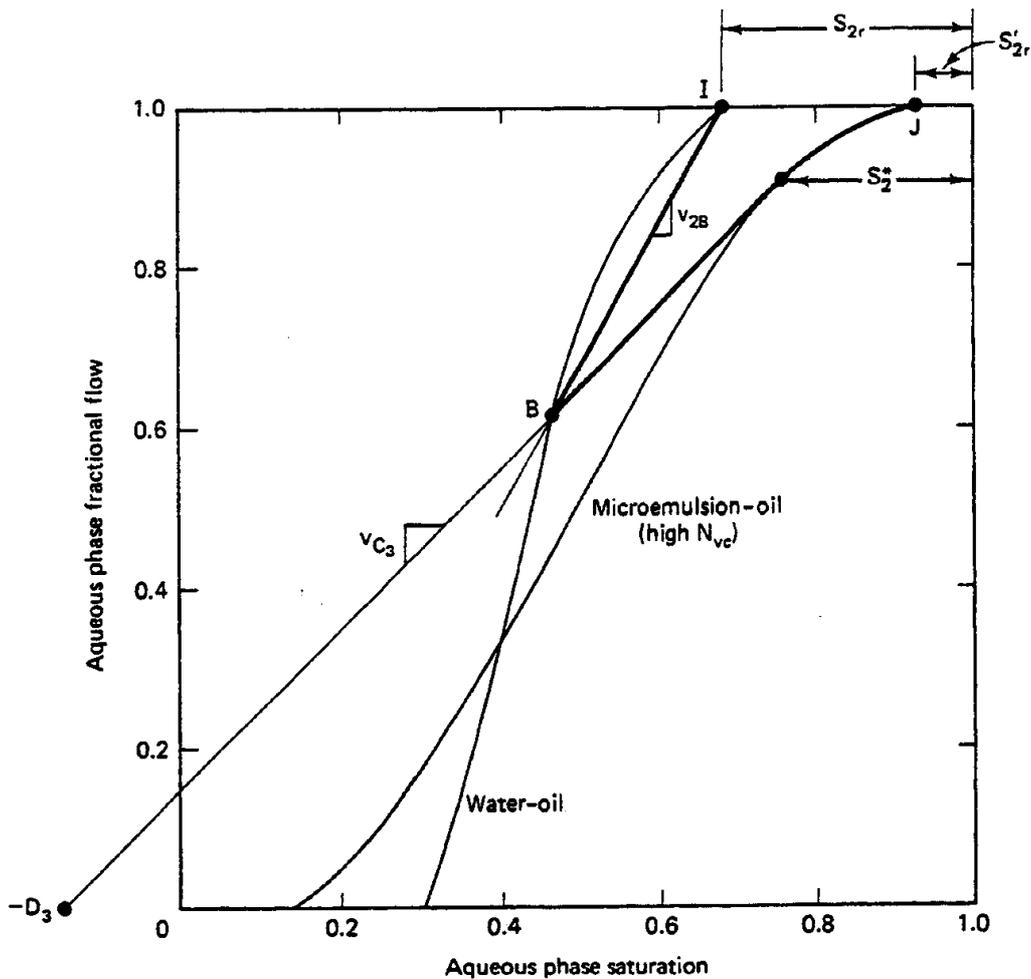


Рис.9-24 Графическое построение для упрощенных вытеснений ПАВ II(-) типа

Эти уравнения являются полностью предположительными для построения полимерного заводнения в Разделе 8-4. Эта параллель становится также очевидной при сравнении построений, приведенных на Рис.9-24 и Рис.8-10. Построение диаграмм время – расстояние и профилей, соответствующих Рис.9-24, оставлено в качестве упражнения.

Вопрос, который не рассматривался в Разделе 8-8 – это минимальный размер оторочки, необходимый для удовлетворения удерживания. Предположим, что вытеснение ПАВ является поршневым, т.е. $S_{2l} = S'_{2r} = S_2^*$. Минимальный размер оторочки ПАВ достигается, когда поршневой фронт ПАВ – полимера аналогичным образом нагоняет фронт ПАВ на конце закачки среды. Это дает минимальный размер оторочки ПАВ, равный $t_{D_s} = D_3$, означая, что потеря на фронте продвижения представляет собой выражение удерживающей способности среды, приведенное в единицах, согласующихся с размером оторочки. Поэтому, знание D_3 является исходной точкой для оценки потребности в ПАВ при мицеллярно-полимерном заводнении. Вышеупомянутый результат не зависит от наличия поршнеобразного фронта ПАВ.

9-11 Взаимодействия породы и жидкости

Минерализация и жесткость воды имели бы гораздо меньшее значение для мицеллярно-полимерного заводнения, если бы проницаемая среда была бы инертной. К сожалению, почти во всех случаях, за исключением искусственных ситуаций, минералы пласта обеспечивают безграничный источник одновалентных и двухвалентных катионов,

равно как и большое количество мест для удерживания ПАВ. Двумя источниками катионов являются растворение минералов и катионообмен. Растворение обычно происходит на таком низком уровне, что им можно пренебречь в мицеллярно-полимерных заводнениях (но не в заводнениях, проводимых в условиях высокого рН). Катионообмен редко бывает незначительным. По этой причине мы довольно подробно рассмотрим этот вопрос в данном разделе. Во второй половине раздела мы обсудим вопрос удерживания ПАВ.

Катионообмен

Рассмотрим простейший случай одновалентного - двухвалентного катионообмена в однофазном потоке в отсутствие ПАВ или нефти. Вытеснение удовлетворяет допущениям движения отдельных фаз в многофазовом потоке. (Более сложный случай см. у Поупа и др., 1978.)

Каждая точка в проницаемой среде должна удовлетворять условиям электронейтральности раствора

$$C_5 = C_6 + C_8 \quad (9.11-1a)$$

и электронейтральности на глинах

$$Z_v = C_{6s} + C_{8s} \quad (9.11-1b)$$

Единицами измерения всех концентраций являются эквиваленты на единицу порового объема, а излишние подстрочные индексы для обозначения фаз, опущены. Эти уравнения предполагают, что концентрации одновалентных, двухвалентных катионов и анионов не являются независимыми; поэтому, для удобства мы решили начать с концентраций двухвалентных катионов и анионов, как зависимых переменных. При локальном равновесии каждая точка в среде должна, кроме того, удовлетворять следующему условию

$$\frac{C_{8s}^2}{C_{6s}} = K_N \frac{C_8^2}{C_6} \quad (9.11-2)$$

что является просто изотермой катионообмена в уравнении (3.5-4). Используя уравнение (9.11-1), мы можем выразить концентрацию адсорбированных двухвалентных катионов как

$$C_{6s} = Z_v \left(1 + \frac{K_{Nr}}{Z_v} \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{Z_v}{K_{Nr}} + \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right) \quad (9.11-3a)$$

где

$$r = \frac{C_8^2}{C_6} = \frac{(C_5 - C_6)^2}{C_6} \quad (9.11-3b)$$

Уравнения (9.11-3) являются основными уравнениями, отображающими равновесие.

Рассмотрим теперь вытеснение раствора I раствором J при вышеупомянутых условиях. Условия когерентности (уравнение 5.6-14)

$$\left(1 + \frac{dC_{5s}}{dC_5} \right)^{-1} = v_{C5} = v_{C6} = \left(1 + \frac{dC_{6s}}{dC_6} \right)^{-1} \quad (9.11-4)$$

удовлетворяются во всех точках среды. Уравнение (9.11-4) подразумевает

$$\frac{dC_{5s}}{dC_5} = \frac{dC_{6s}}{dC_6} = \lambda \quad (9.11-5)$$

где λ – характеристическое число для этой задачи. В матричной форме уравнение (9.11-5) принимает вид

$$\begin{pmatrix} C_{55} & C_{56} \\ C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dC_5 \\ dC_6 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} dC_5 \\ dC_6 \end{pmatrix} \quad (9.11-6)$$

где $C_{65} = (\partial C_{6s} / \partial C_5)_{C_6}$ и т.д. Матричная форма в левой части имеет ряд нулей, потому что анионы не адсорбируются. Решение уравнения (9.11-6) для характеристических чисел дает

$$\lambda^- = 0, \quad \lambda^+ = C_{56} \quad (9.11-7)$$

Из этого следует, что $\lambda^+ > \lambda^-$ и, что волна, соответствующая λ^- , быстрее волны, соответствующей λ^+ , исходя из уравнения (9.11-4).

Собственный вектор, соответствующий каждому характеристическому числу, дает изменение концентрации в каждой волне. Для более быстрой волны подстановка λ^- дает

$$(9.11-8a)$$

а для медленной волны, подставляя λ^+ , получаем

$$C_{65}dC_5 + C_{66}dC_6 = 0 \quad (9.11-8b)$$

Мы тотчас же видим, что концентрация анионов постоянна в медленной волне, т.к. $dC_5=0$. Интерпретация быстрой волны очевидна не намного меньше. Уравнение (9.11-8a) – это изменение в C_5 и C_6 , которое произошло бы при постоянном C_{6s} . Мы видим это, установив полный дифференциал dC_{6s}

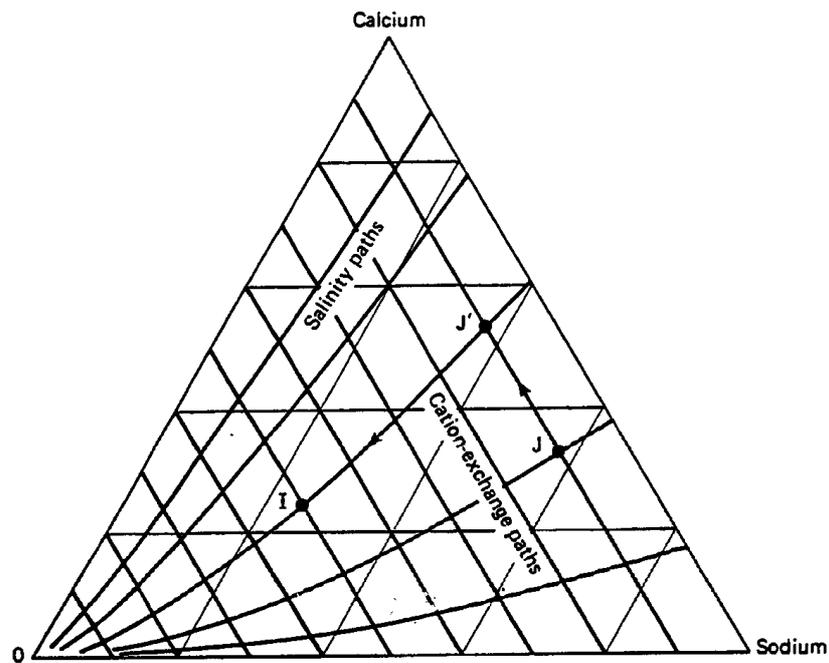
$$dC_5 = 0 \quad (9.11-9)$$

равным нулю. Результат (уравнение 9.11-9) не зависит от формы изотермы обмена.

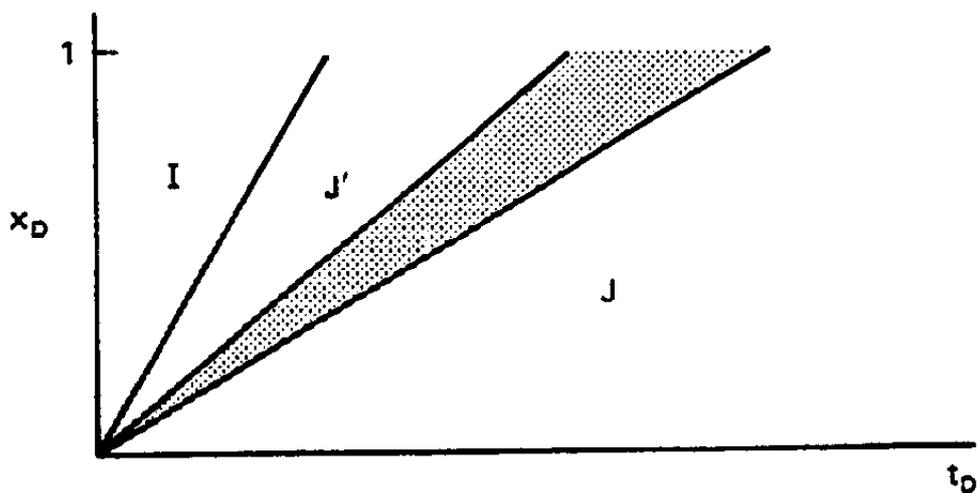
Поэтому последовательное решение прогнозирует две волны: индифферентную волну минерализации, которая движется с единичной скоростью, в которой концентрация глины остается постоянной, и волну обмена, где концентрация глины изменяется, стремясь быть в равновесии с закачиваемым раствором при постоянной концентрации анионов. Характер последней волны зависит от направления, в котором возрастает скорость концентрирования, по уравнениям (9.11-3) и (9.11-4).

Например, рассмотрим Рис.9-25(a), который показывает композиционное пространство для двухкатионной системы, представленной графически на тройной диаграмме. Линии постоянной концентрации анионов параллельны правому краю, а линии постоянного состава глины представляют собой кривые, сходящиеся в нижнем левом углу. Эти кривые описаны уравнением (9.11-3). Обе серии линий образуют диаграмму траектории состава. Выделенные жирным сегменты линий – $I-J'$ (волна минерализации) и $J'-J$ (волна обмена) образуют траекторию состава. Выбрана эта конкретная последовательность, потому что это единственная последовательность, при которой скорости концентрирования монотонно убывают от I до J . Волна обмена является распространяющейся, если скорость концентрирования убывает от J' до J ; в противном случае – это импульс. На Рис.9-25(b) показана диаграмма время – расстояние для первого случая.

Чтобы проиллюстрировать точность вышеупомянутых прогнозов, рассмотрим Рис.9-26, показывающий характер изменения выходящего потока в двух лабораторных ядерных



(a) Диаграмма траектории состава



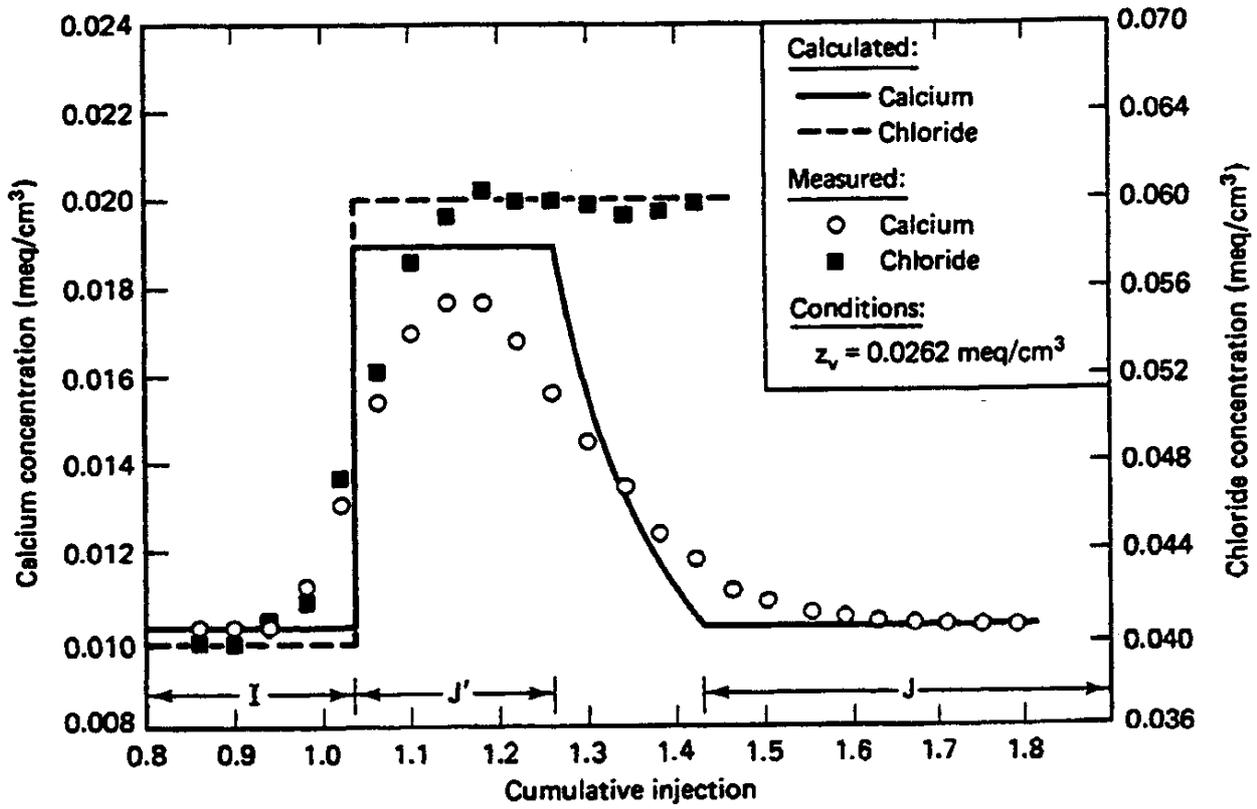
(b) Диаграмма время - расстояние

Рис.9-25 Диаграммы для случая обмена двух катионов (Поуп и др., 1978)

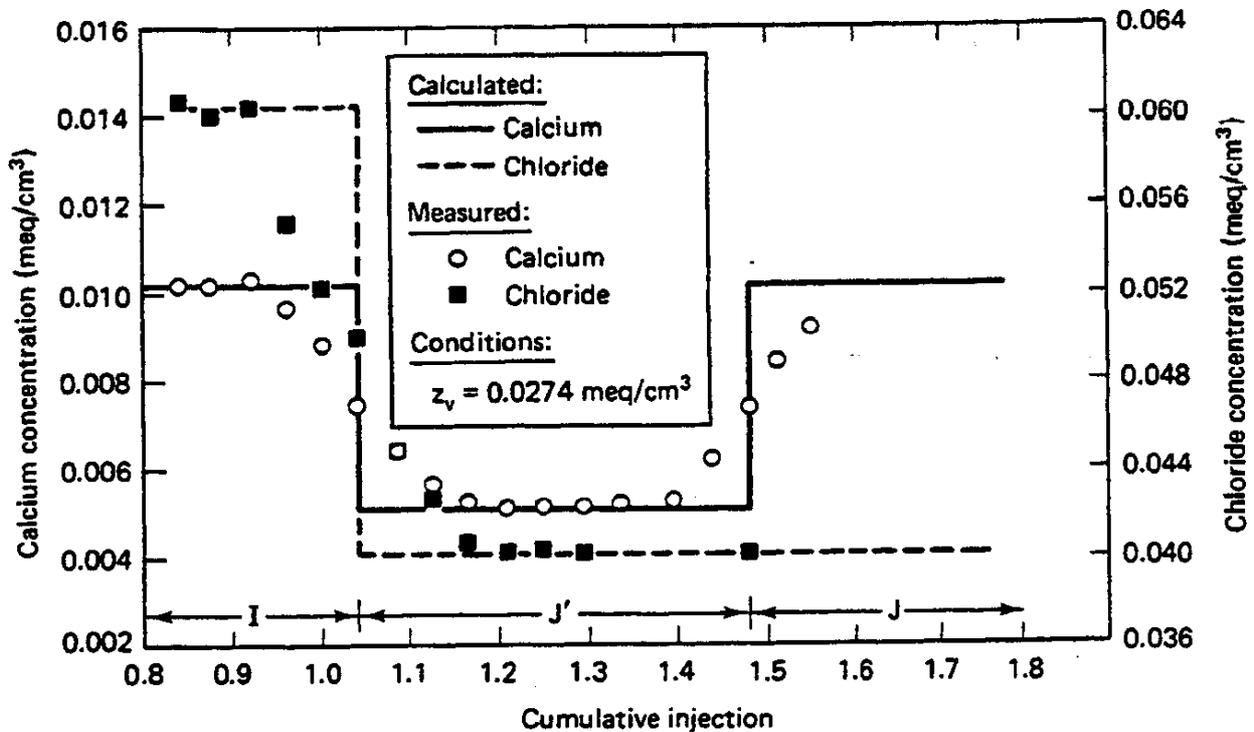
заводнениях, в которых растворы, пропускаемые через керн, содержали только кальций (двухвалентные катионы), натрий (одновалентные катионы) и хлорид (анион). В обоих случаях количество закачиваемого кальция было одинаковым; следовательно, в отсутствие обмена концентрация кальция в выходящем потоке не должна изменяться. Но ввиду изменения концентрации аниона, происходит катионообмен, а количество кальция в выходящем потоке не изменяется. На Рис.9-26(a) повышенная концентрация аниона является причиной того, что кальций вытесняется из глин. На Рис.9-26(b) происходит обратное. В обоих случаях прогноз, основанный на последовательном изложении, хорошо согласуется с наблюдаемыми результатами. Расчетные результаты, включая дисперсию, показывают еще лучшее соответствие (Лэйк и Гелфферих, 1978).

Эти результаты имеют большое практическое значение для мицеллярно-полимерного заводнения вообще, и для предварительных промывок слабоминерализованной водой в частности. Одной из задач предварительной промывки является удаление двухвалентных

катионов с тем, чтобы оторочка могла работать эффективнее. Однако вышеупомянутая теория наводит на мысль о следующем препятствии:



(a) Распространяющаяся волна обмена



(b) Заостряющаяся волна обмена

Рис.9-26 Сравнение теоретических и экспериментальных результатов для вытеснения, в котором происходит двухкатионный обмен (Поуп и др., 1978)

1. Вполне возможно осуществлять закачки слабоминерализованного состава, который фактически загружает глины двухвалентными катионами, потому что изменения в коэффициенте γ определяют загрузку глины. Если γ уменьшается, значит, глины поглощают двухвалентные катионы, которые независимо от минерализации, будут в наличии для последующего выделения в раствор.
2. Даже если γ уменьшается так, что глины избавляются от двухвалентных катионов, для этого обычно требуется большой объем промывки, т.к. скорость волны обмена очень медленная при типичных способностях к катионообмену и концентрациях раствора.
3. Если закачиваемый раствор полностью свободен от двухвалентных катионов, глины будут все же лишь частично избавляться от них, т.к. растворение небольшого количества минералов, содержащих двухвалентные катионы, действует как постоянный источник жесткости.

Одна из задач предварительной промывки заключается в том, чтобы любой ценой избежать нарушения глин. Сделать это в принципе легко: нужно просто закачать состав предварительной промывки, оторочку и вытеснить полимером при таком же коэффициенте γ , который существует в пластовой воде. Но на практике эта процедура осложняется смешиванием, вызванным дисперсией (Лэйк и Гелфферих, 1978), и обменом двухвалентных катионов с мицеллами (см. Раздел 9-8).

Удерживание ПАВ

Удерживание ПАВ является, вероятно, наиболее существенным барьером для промышленного применения мицеллярно-полимерного заводнения. Проблема здесь заключается в избирательной способности. ПАВ-ва должны обладать хорошей избирательной способностью по отношению к поверхности раздела нефти и воды, и должны иметь слабую избирательную способность по отношению к поверхностям раздела жидкой – твердой фазы.

ПАВ удерживаются посредством четырех механизмов.

1. На поверхности окислов металлов (Рис.9-27) мономер ПАВ будет адсорбироваться физически за счет образования водородных связей и будет образовывать ионные связи с катионными местами на поверхности. При повышенных концентрациях ПАВ эта связь включает в себя взаимодействия хвостовых частей с мономерами раствора, приводя к пропорционально большей адсорбции. При критической концентрации мицеллообразования и выше нее приток мономеров становится постоянным, как и удерживание. Изотерма (Лэнгмюра) зависимости адсорбции от общей концентрации ПАВ напоминает график критического мицеллообразования, представленный на Рис.9-4, который может быть выражен как

$$C_{3s} = \frac{a_3 C_3}{1 + b_3 C_3} \quad (9.11-10)$$

где a_3/b_3 отображает величину адсорбции на пологой части кривой. Здесь C_3 является концентрацией ПАВ в жидкой фазе, смачивающей нижний слой. Параметр b_3 является большим, будучи связанным с критической концентрацией мицеллообразования, которая очень невелика по сравнению с практическими концентрациями ПАВ (см. Рис.9-28). Поэтому изотерма ПАВ достигает пологого участка кривой при такой низкой величине C_3 , что она может быть удобно представлена в виде ступенчатой функции. Эта форма удерживания должна быть обратной в зависимости от концентрации ПАВ. Параметры a_3 и b_3 являются функциями минерализации, т.к. они зависят от количества мест на поверхности, доступных для адсорбции.

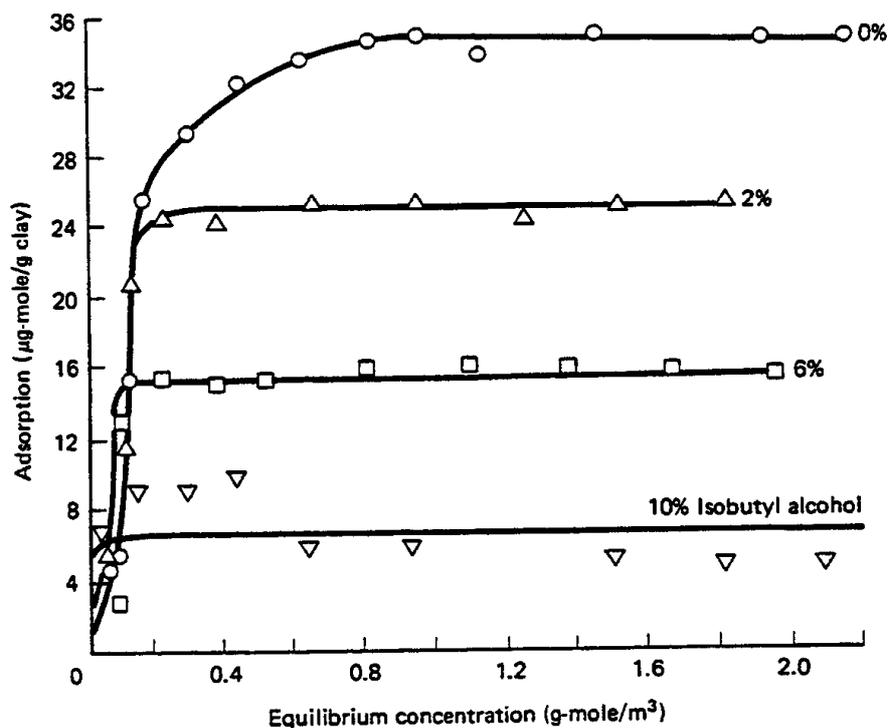


Рис.9-27 Адсорбция ПАВ на поверхности окислов металлов (Харуэлл, 1983)

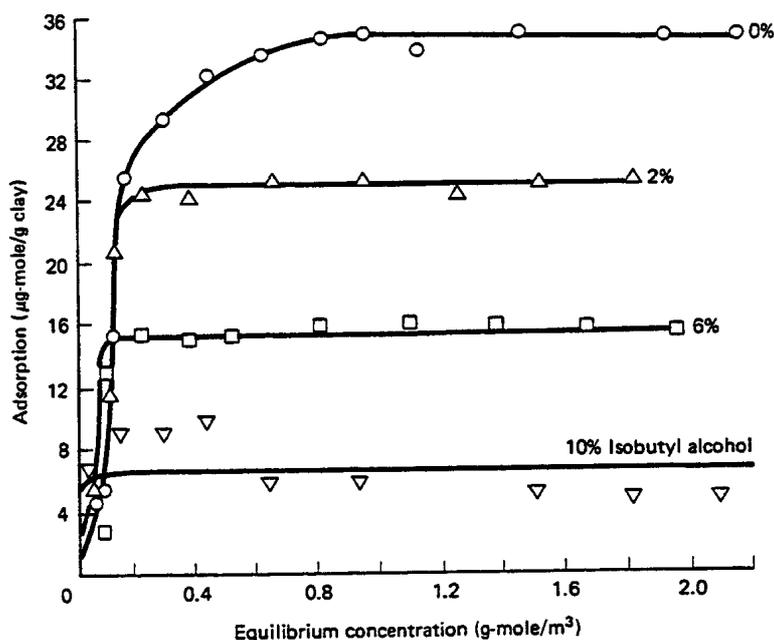
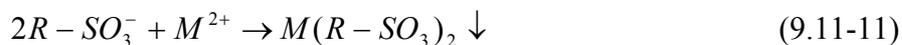


Рис.9-28 Влияние содетергента на удерживание ПАВ. В качестве ПАВ используется 4-фенилдодецилбензолсульфонат (Фернандез, 1978)

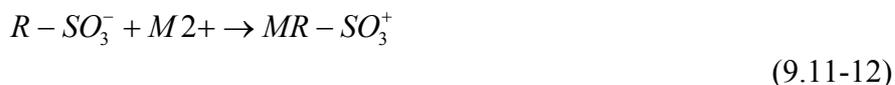
2. В жесткой воде преобладание двухвалентных катионов вызывает образование комплексов ПАВ – двухвалентный катион



которые имеют более слабую растворимость в воде. Выпадение этого комплекса в осадок приведет к удерживанию. Когда присутствует нефть, она может конкурировать за ПАВ.

Конечно, осадок должен тоже конкурировать с мицеллами за ПАВ (Сомасандран и др., 1979).

3. При уровнях жесткости, более низких, чем требуется для образования осадка, предпочтительным многовалентным ПАВ будет одновалентный катион, который может химически обмениваться с катионами, первоначально связанными с глинами пласта (Хилл и Лэйк, 1978)



Этот эффект отличается от эффекта, обусловленного связью двухвалентного катиона и мицеллы, который мы рассматривали в Разделе 9-8. ПАВ, связанный с глинами, проявляет взаимодействие хвостовых частей, как на Рис.9-27.

Как следствие ионного связывания и взаимодействия хвостовых частей, добавление содетергента снизит оба типа удерживания (Рис.9-28). Содетергент осуществляет это двумя способами: (1) заполняя места на поверхности, которые могли бы быть в противном случае заняты ПАВ, и (2) уменьшая связи, образуемые хвостовыми частями. Удерживание, выраженное уравнением (9.11-12), может быть также уменьшено за счет заполнения мест на глине более предпочтительным катионом металла. Эта форма удерживания является обратимой в зависимости от концентрации как M^{2+} , так и ПАВ.

4. При наличии нефти в фазовом окружении системы II(+) типа ПАВ будет находиться в микроэмульсионной фазе (микроэмульсия с внешней нефтяной фазой). Т.к. эта область находится выше оптимальной минерализации, межфазное натяжение довольно большое, и эта фаза, и ее растворенное ПАВ могут быть уловлены. Это явление показано на Рис.9-29. Закрашенные квадратики изображают закачанное ПАВ, а не закрашенные – ПАВ, удержанное в ряде керновых заводнений, проводившихся при постоянной минерализации. Удерживание постепенно возрастает с увеличением минерализации (как a_3 , так и b_3 являются функциями минерализации) до достижения 3% концентрации NaCl, после чего удерживание возрастает так сильно, что все закачиваемое ПАВ оказывается удержанным. 3% NaCl находится как раз над C_{Seu} для этой системы; отсюда, отклонение может быть объяснено фазовым улавливанием. Подобный эффект фазового улавливания не происходит при системе II(-) типа, т.к. водная буферная оторочка, регулирующая подвижность, смешивающимся образом вытесняет уловленную микроэмульсионную фазу (микроэмульсия с внешней водной фазой). Следовательно, использование минерализации меньше оптимальной может исключить фазовое улавливание. На эту форму удерживания сильно влияет мицеллярно-полимерное фазовое поведение.

В большинстве исследований удерживания ПАВ эти механистические различия не проводились. Поэтому не ясно, какой механизм преобладает в данном случае. При всех механизмах происходит большее удерживание ПАВ в условиях высокой минерализации и жесткости, действие которых может быть ослаблено за счет добавления содетергента. Выпадение в осадок и улавливание фаз можно устранить путем снижения минерализации буферной оторочки, регулирующей подвижность, при которой преобладает механизм химической адсорбции на глины пласта. В этом случае должна быть произведена некоторая корреляция удерживания ПАВ с содержанием глин в пласте. На Рис.9-30 предпринята попытка представить эту корреляцию путем построения графика зависимости лабораторных и промышленных данных удерживания ПАВ от доли глины в пласте. Эта корреляция отнюдь не идеальна, т.к. она не учитывает изменения в мицеллярно-полимерном составе, распределение глин, равно как и действие минерализации.

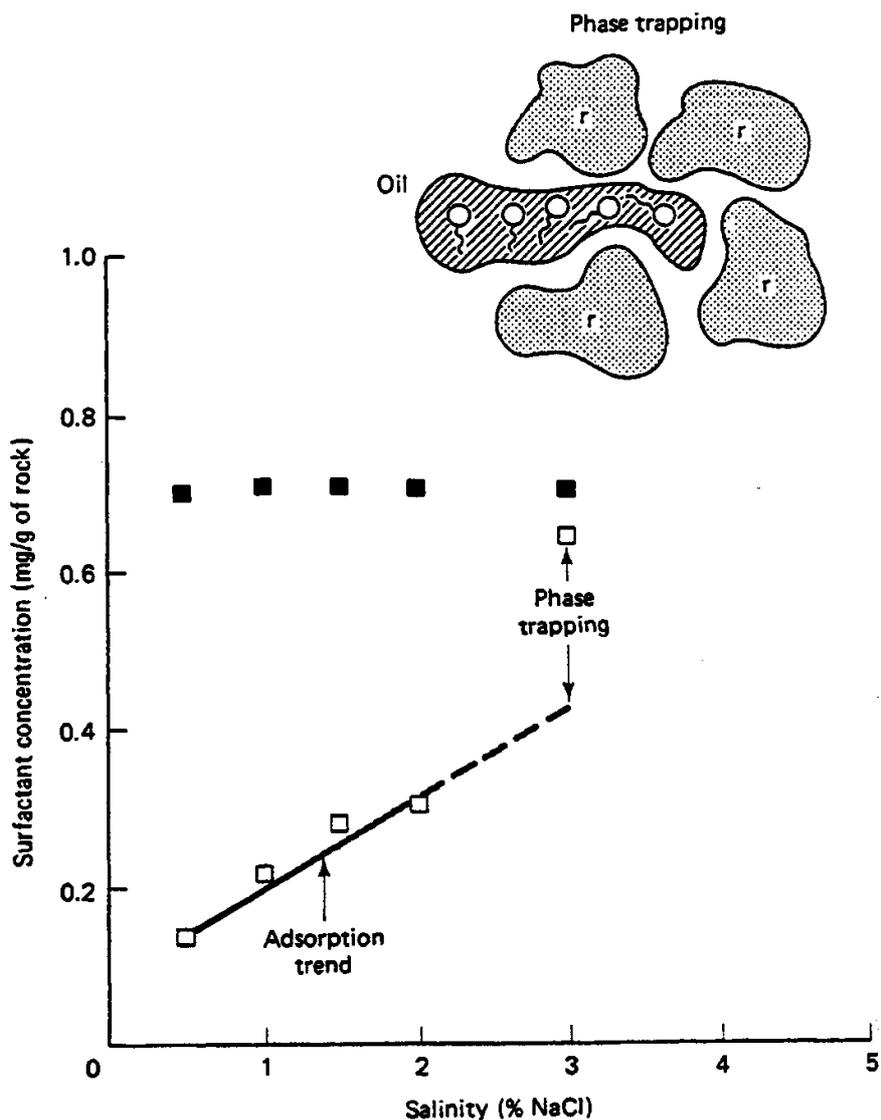


Рис.9-29 Удерживание ПАВ, уловленное улавливанием фаз; 3% NaCl – это микроэмульсионная система II(+) типа (Гловер и др., 1979)

Однако рисунок отражает основную тенденцию, что может оказаться полезным для оценки удерживания первого порядка. Кроме того, отметьте, что разница между удерживанием, определяемым в лабораторных и промысловых условиях, несущественна. Это наблюдение подразумевает, что удерживание ПАВ можно с успехом измерять в лабораторных условиях.

Удобным способом определения объема ПАВ, необходимого для мицеллярно-полимерной оторочки, является использование отставания безразмерной фронтальной скорости продвижения D_3 , определяемого в уравнении (9.10-6). C_{3s} – это удерживание ПАВ, согласно Рис.9-30 (величина a_3 / b_3 на соответствующей изотерме), ϕ – пористость, C_{3l} – концентрация ПАВ в мицеллярно-полимерной оторочке, а ρ_s – плотность ПАВ. D_3 – это доля, которая показывает объем ПАВ, удержанного при его закачиваемой концентрации, в виде доли порового объема, который может быть заводнен V_{pf} . Для оптимального использования ПАВ, объем закачиваемого ПАВ должен быть достаточно большим, чтобы контактировать со всем V_{pf} , и в то же время небольшим, чтобы предотвратить избыточную добычу ПАВ.

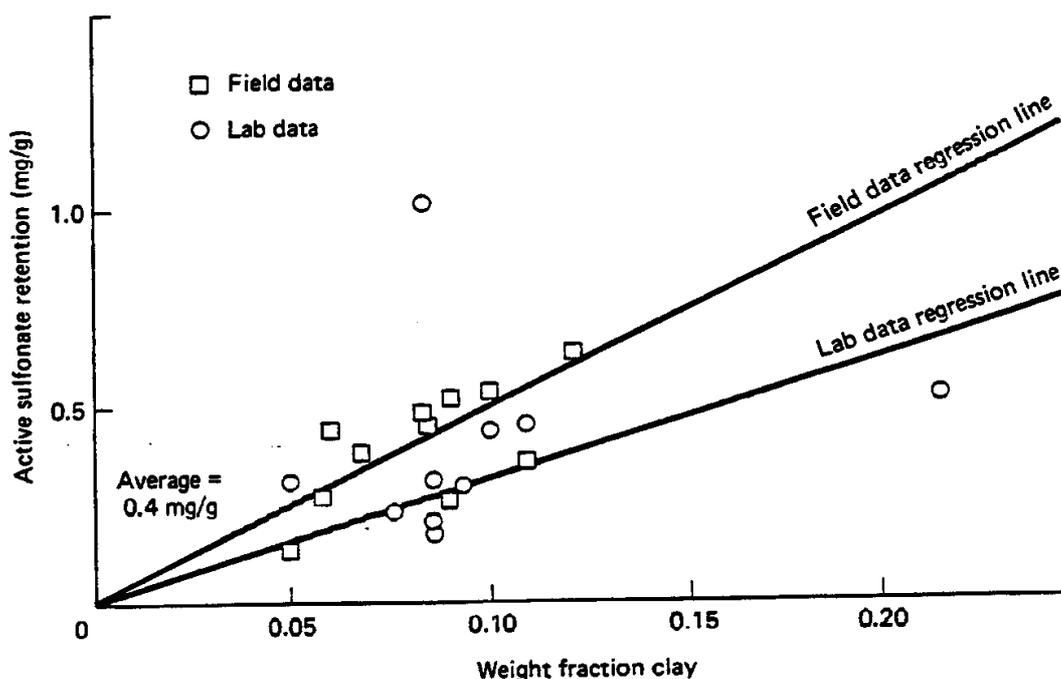


Рис.9-30 Общее количество удержанного ПАВ, коррелированное по содержанию в пласте глины (Голдбург и др., 1983)

Помимо нежелательной пустой траты дорогостоящего химреагента, добываемое ПАВ может привести к образованию нежелательных эмульсий. Таким образом, размер мицеллярно-полимерной оторочки должен быть не меньше, но и не намного больше, чем D_3 . Общее количество закачиваемого ПАВ не зависит от закачанного ПАВ, т.к. по уравнению (9.10-6) D_3C_{3J} не зависит от C_{3J} .

9-12 Типичное реагирование на воздействие мицеллярно-полимерным составом

В этом разделе мы приведем обзор результатов лабораторных и промысловых испытаний, чтобы проанализировать важные особенности и предполагаемые результаты мицеллярно-полимерного заводнения.

Лабораторное заводнение

На Рис.9-31 представлены графики, показывающие выходящий поток после типичного мицеллярно-полимерного заводнения, проводимого на керне песчаника Бириа, с указанием доли нефти, концентраций добываемого ПАВ (Mahogany AA), содетергента (изопропилового спирта), полимера и анионов хлорида. Все концентрации нормализованы с соответствии с их величиной при закачке. Анионы хлорида указывают на минерализацию в этом заводнении. В верхней части рисунка представлено фазовое окружение добываемых жидкостей. Размер оторочки составляет $t_{Ds} = 0.1$, а горизонтальная ось – t_D – это объем закачаных жидкостей с момента закачки оторочки, выраженный в виде функции порового объема керна. Предварительная промывка не проводилась. (Более подробное описание этого и подобных керновых заводнений см. Гупта, 1980.)

На Рис.9-31 представлен типичный, отнюдь не оптимальный эксперимент по повышению нефтеотдачи. До закачки ПАВ керн подвергался воздействию обычного заводнения, так что первоначально он не давал нефти. Прорыв нефти происходит примерно при $t_D = 0.2$, с

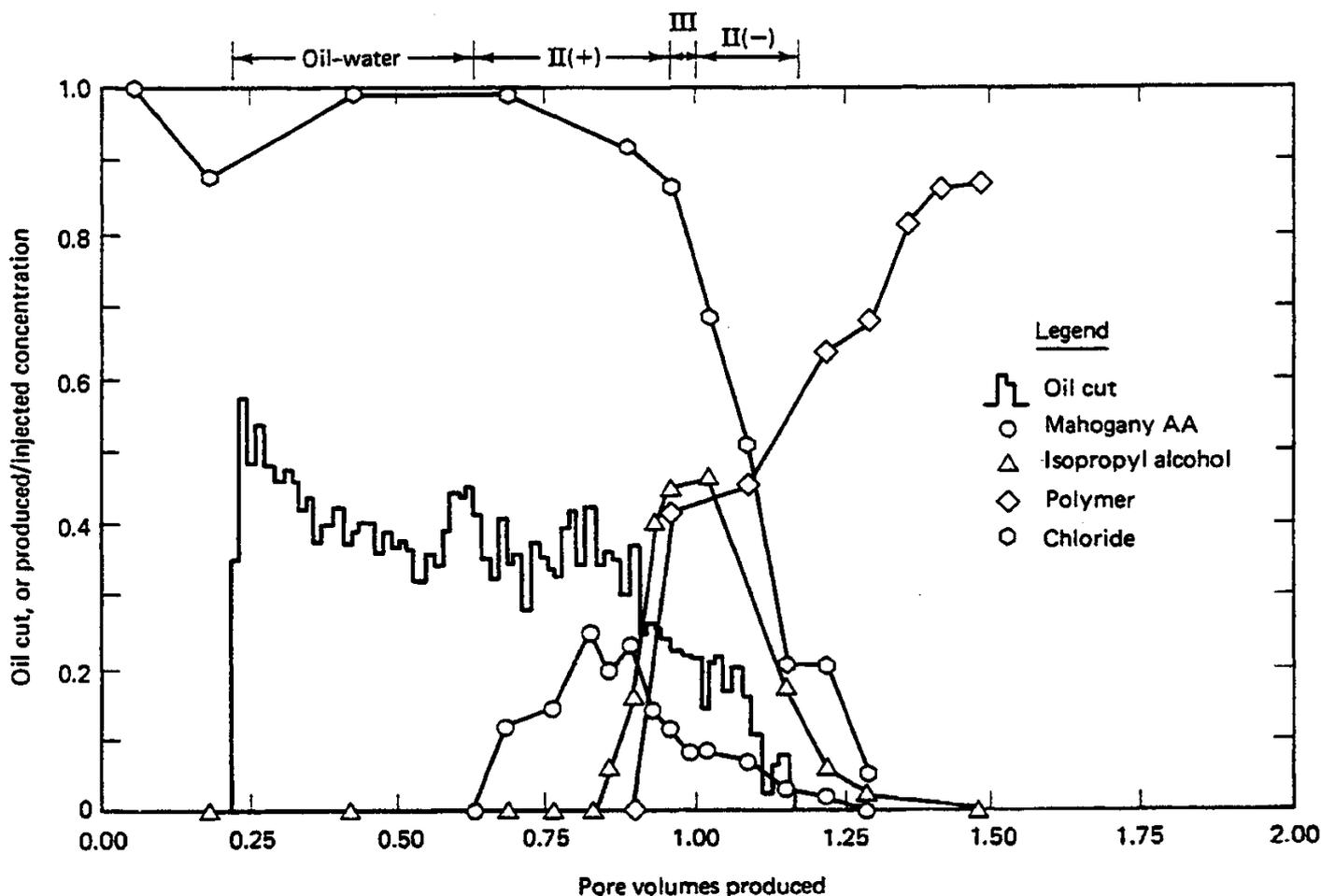


Рис.9-31 Типичная добыча в керновом заводнении (Гупта, 1980)

относительно постоянным количеством приблизительно 40% до примерно $t_D = 0.6$, когда появляется ПАВ. Поведение в этой части заводнения согласуется с теорией движения отдельных фаз в многофазовом потоке, рассмотренной в Разделе 9-10. Приблизительно 60% добытой нефти не содержит закачиваемых химреагентов. То, что 40% нефти добывается с ПАВ, указывает на вязкостную нестабильность, очевидно обусловленную неидеальным фазовым поведением. Хорошо разработанное заводнение даст 80 – 90% нефти до появления ПАВ. Даже здесь, в лабораторных опытах, хотя нефть неизменно добывается рано и в довольно малых количествах.

ПАВ прорывается при $t_D = 0.6$, достигает максимальной концентрации при 30% закачанной концентрации ($t_D = 0.8$) и прекращается при $t_D = 1.5$. Общее количество добываемого ПАВ составляет примерно половину от закачанного количества, что указывает на значительное, хотя и не чрезмерное удерживание.

ПАВ появляется раньше как хлорида, так и полимера, примерно на $0.3 V_p$. Это разделение указывает на избирательное распределение содетергента между водной и микроэмульсионной фазами (см. Раздел 9-8 – неидеальности фазового поведения). Хотя это не оказывает чрезмерного влияния на нефтеотдачу, которая составляет более 90% от количества остаточной нефти, это разделение не является благоприятствующим признаком для этой разработки. Хорошая разработка мицеллярно-полимерного заводнения должна показать одновременную добычу всех составляющих мицеллярно-полимерной оторочки, равно как и хорошую нефтеотдачу.

Нефтеотдача в промысловых условиях

В качестве примера рассмотрим Рис.9-32, который показывает анализ жидкостей, добытых из скважины 12-1, в мицеллярно-полимерном заводнении, проводившемся на месторождении Белл Крик (Монтана). В этом заводнении применялась мицеллярно-полимерная оторочка с большим содержанием нефти, которой предшествовала предварительная промывка, во время которой производилась закачка силиката натрия для того, чтобы уменьшить удерживание ПАВ и снизить концентрацию двухвалентных катионов. Скважина 12-1 – это добывающая скважина, расположенная в центре неограниченного одиночного пяти-точечного элемента. (Подробное описание заводнения см. Холм, 1982; Ахо и Буш, 1982.)

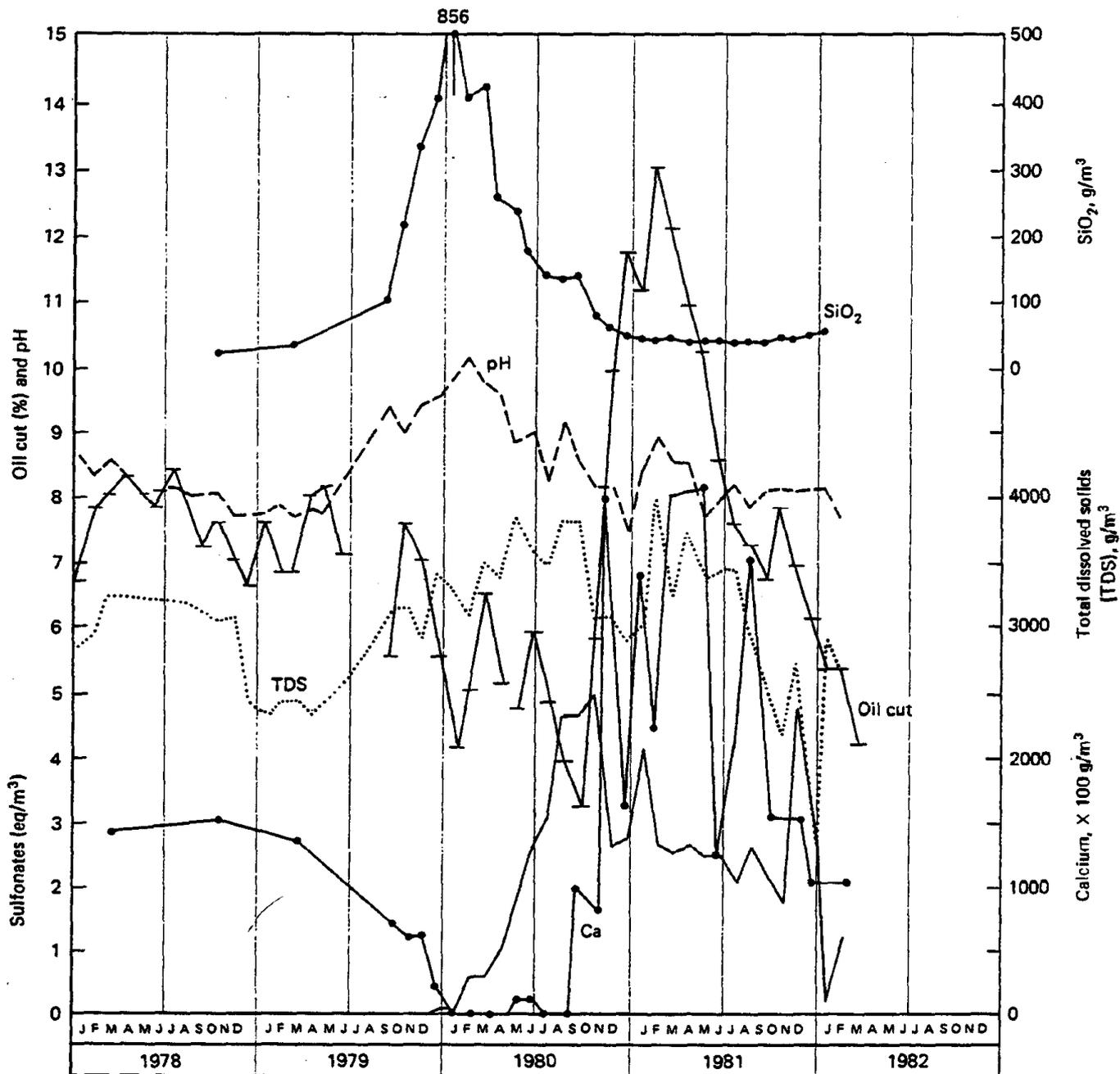


Рис.9-32 Нефтеотдача в опытном заводнении на месторождении Белл Крик (Холм, 1982)

До закачки мицеллярно-полимерной оторочки в феврале 1979 г скважина 12-1 давала низкое (уменьшающееся) количество нефти. Позднее в 1980 г добыча нефти за счет закачки мицеллярно-полимерной оторочки начала расти и достигла максимума (примерно 13%) месяцев шесть спустя. Нужно четко определить падение добычи до закачки мицеллярно-полимерной оторочки для того, чтобы точно определить нефтеотдачу за счет мицеллярно-полимерного заводнения, этап, который не является обязательным при оценке эффективности лабораторных керновых заводнений. Кроме того, по сравнению с керновым заводнением, не существует очевидной чистой добычи нефти; добыча ПАВ фактически предшествовала добыче нефти. Одновременная добыча нефти и ПАВ является характерной особенностью промысловых мицеллярно-полимерных заводнений, вероятно, из-за неоднородностей и дисперсивного смешивания. На Рис.9-32 ПАВ предшествует нефти из-за избирательно действующих водо-растворимых компонентов дисульфоната, содержащихся в мицеллярно-полимерной оторочке. Максимальная доля нефти в добываемой жидкости в промысловых заводнениях неизменно ниже (13% на Рис.9-32 против почти 60% на Рис.9-31).

Другими важными особенностями, отраженными на Рис.9-32, являются предварительная промывка, осуществляемая до закачки мицеллярно-полимерной оторочки, из чего делается вывод о максимальном значении pH и большой концентрации силикатов, и эффективное удаление катионов кальция до ПАВ. Но когда начиналась добыча нефти, количество кальция возрастало примерно до уровня, существовавшего до закачки мицеллярного состава.

На Рис.9-33 показан коэффициент нефтеотдачи E_R (суммарное количество добытой нефти, разделенное на количество нефти в пласте на начало процесса мицеллярно-полимерного заводнения), полученный на основании данных более 40 мицеллярно-полимерных промысловых испытаний, коррелированный в виде функции размера буферной оторочки, регулирующей подвижность t_{DMB} . Подобные анализы по другим переменным процесса показали слабую корреляцию или полное ее отсутствие (Лэйк и Поуп, 1979). Сильная корреляция на Рис.9-33 указывает на важность регулирования подвижностей при разработке мицеллярно-полимерных заводнений. Хотя мы почти совершенно не учитывали регулирование подвижностей в этой главе, несомненно – это очень важная переменная.

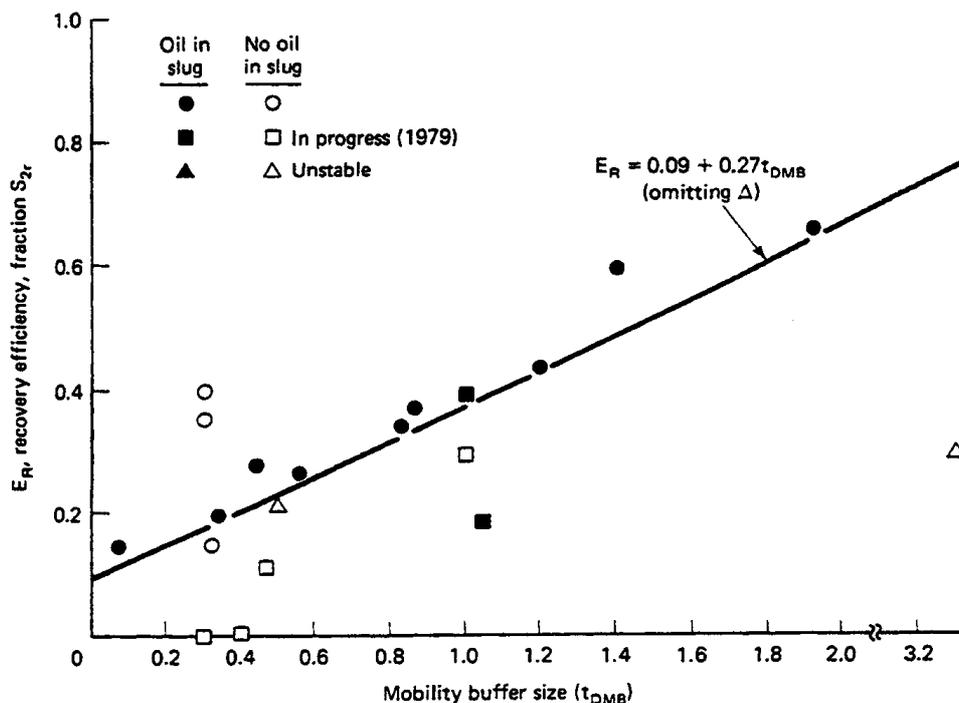


Рис.9-33 Коэффициенты нефтеотдачи по данным более чем 21 мицеллярно-полимерного промыслового заводнения (Лэйк и Поуп, 1979)

Как видно из Рис.9-33, оторочки с высоким содержанием нефти как правило вытеснялись большими по размеру полимерными оторочками, чем оторочки с высоким содержанием воды.

В промысловых испытаниях предельный коэффициент нефтеотдачи в среднем составляет 30% от остаточной нефтенасыщенности (Рис.9-33). Т.к. коэффициент нефтеотдачи может быть довольно высоким в керновых заводнениях, по-видимому, максимальная доля нефти в добываемой жидкости и предельный коэффициент нефтеотдачи в технически успешных мицеллярно-полимерных промысловых заводнениях в среднем будут составлять примерно одну треть от соответствующих результатов керновых заводнений.

9-13 Разработка мицеллярно-полимерного заводнения

Успешное мицеллярно-полимерное заводнение должно достичь трех вещей для получения эффективной нефтеотдачи (Гиллиланд и Конлей, 1975):

1. Оторочка ПАВ в мицеллярно-полимерном заводнении должна распространяться в активном режиме по поверхности раздела фаз (т.е. при оптимальных условиях).
2. Должно быть закачано достаточное количество ПАВ с таким расчетом, чтобы какое-то его количество оставалось не удерживаемым поверхностью проницаемой среды.
3. Активное ПАВ должно охватить большую часть пласта без чрезмерного рассеивания, возникающего в результате дисперсии или образования протоков.

Первая из вышеперечисленных целей достигается на этапе подбора состава при разработке мицеллярно-полимерного заводнения; два вторых условия удовлетворяются за счет увеличения количества. Несмотря на значительное наложение, этап подбора состава состоит, главным образом, из опытов на трубках и керновых заводнений; этапы подбора масштабов состоят в основном из керновых заводнений и числового моделирования.

Создание оптимальных условий

Существует три метода создания оптимальных условий в мицеллярно-полимерных заводнениях.

1. Увеличьте оптимальную минерализацию мицеллярно-полимерной оторочки до минерализации пластовой воды. С философской точки зрения, этот метод является наиболее удовлетворительным из трех возможностей, и обычно наиболее трудным. Впрочем, несмотря на то, что это предмет интенсивных исследований, еще только предстоит найти ПАВ-ва, которые имели бы высокую оптимальную минерализацию, были бы в то же время стойкими в пластовых условиях при чрезмерном удерживании их твердыми поверхностями, или были бы недорогими. Успех промысловых испытаний, в которых применялись синтетические ПАВ, показал техническую осуществимость этого метода (Брэгг и др., 1982). Вторым способом доведение оптимальной минерализации мицеллярно-полимерной оторочки до минерализации пластовой воды является добавление содетергента. Сегодня - это наиболее часто применяемый метод; однако, как мы уже упоминали, в разделении ПАВ – содетергента имеются некоторые проблемы: потеря межфазной активности и расход.
2. Снижение минерализации пластовой воды для того, чтобы довести ее до соответствия минерализации мицеллярно-полимерной оторочки. Это и является главной задачей предварительной промывки, проиллюстрированной на Рис.9-1. Успешная предварительная промывка весьма привлекательна потому, что при снижении минерализации пластовой воды мицеллярно-полимерная оторочка вытеснит нефть отовсюду, в какую бы часть пласта она ни пошла, и удерживание тоже будет низким. Как правило, из-за эффектов смешивания и катионообмена, для того, чтобы существенно

уменьшить минерализацию пластовой воды, требуются большие объемы предварительных промывок (см. Раздел 9-11). При некотором планировании функцию предварительной промывки можно было бы осуществить на этапе обычного заводнения, предшествующего мицеллярно-полимерному заводнению.

3. Применение новой методики подбора постепенно меняющейся минерализации для создания активных мицеллярно-полимерных оторочек (Пол и Фронинг, 1973; Нельсон и Поуп, 1978; Хирасаки и др., 1983). Эта методика пытается динамично снизить минерализацию пластовой жидкости до оптимальной в ходе вытеснения, за счет размещения мицеллярно-полимерной оторочки между пластовой водой, имеющей минерализацию выше оптимальной, и буферной оторочкой, регулирующей подвижность, минерализация которой ниже оптимальной. В Таблице 9-4 представлены результаты керновых заводнений при применении различной последовательности минерализаций. Номера опытов в этой таблице соответствуют числам, приведенным на Рис.9-8. Выделяются три заводнения - № 3, 6 и 7 – как по низкой предельной насыщенности, так и по удерживанию ПАВ. Общей особенностью всех этих опытов является то, что минерализация полимерной оторочки ниже оптимальной. Фактически никакая другая переменная, включая концентрацию оторочки ПАВ, не имеет такого аналогично сильного влияния (Поуп и др., 1982). Подбор градиента минерализации имеет ряд других преимуществ: позволяет гибко обходить неопределенности процесса, обеспечивает благоприятное окружение для полимера в буферной оторочке, регулирующей подвижность, сводит к минимуму удерживание и не зависит от эффекта разбавления ПАВ.

Таблица 9-4 Тип фазового окружения и характеристика мицеллярно-полимерного заводнения для диаграммы необходимой минерализации, представленной на Рис.9-8 (Нельсон, 1982)

Номер химического заводнения	Тип фазы, которому способствует			Остаточная нефтенасыщенность после химического заводнения (% VP)	Закачанное ПАВ, удержанное в керне (%)
	Обычное заводнение	Химическая оторочка	Полимерное вытеснение		
1	II(-)	II(-)	II(-)	29.1*	52
2	II(+)/III	II(+)/III	II(+)/III	25.2*	100*
3	II(+)/III	II(+)/III	II(-)	2.0 [†]	61*
4	II(-)	II(-)	II(+)/III	17.6*	100*
5	II(-)	II(+)/III	II(+)/III	25.0	100
6	II(+)/III	II(-)	II(-)	5.6 [†]	59 [†]
7	II(-)	II(+)/III	II(-)	7.9*	73*
8	II(+)/III	II(-)	II(+)/III	13.7 [†]	100*

* Среднее количество опытов, повторенных дважды

† Среднее количество опытов, повторенных трижды

Закачка достаточного количества ПАВ

Первым делом для преодоления проблем, связанным с удерживанием, является разработка заводнения с таким расчетом, чтобы удерживание было по возможности минимальным. Это включает в себя сведение к минимуму эффектов химической и физической адсорбции, рассмотренных выше, и исключение улавливания фаз за счет снижения минерализации среды, по которой проходит оторочка. Применение содетергентов и жертвенных агентов может также оказаться целесообразным. После того, как достигнута низкая величина удерживания ПАВ, необходимо закачать достаточное количество ПАВ с таким расчетом, чтобы какое-то его количество перемещалось к добывающим скважинам. Как и при полимерном заводнении, у этого вопроса два аспекта: концентрация ПАВ в оторочке и размер оторочки.

Не существует веских теоретических или практических доводов, которые могут повлиять на выбор концентрации ПАВ в оторочке. Концентрация должна быть достаточно большой, чтобы могла образоваться область системы III типа в условиях оптимальной минерализации, но в то же время оторочка должна быть сравнительно небольшой, чтобы не вызывать проблем при ее закачке и продвижении в пласте. Последнее требование обычно означает, что оторочка должна быть однофазной и не должна обладать повышенной вязкостью, а ПАВ не должно выпадать в осадок.

Возможно, более жесткий нижний предел устанавливается для концентрации ПАВ в связи с относительной скоростью его распространения в проницаемой среде. Потеря D_3 на фронте продвижения содержит в знаменателе концентрацию ПАВ. Это означает, что скорость распространения оторочки, а также максимальная доля нефти, рассчитанная по теории движения отдельных фаз в многофазовом потоке (Рис.9-24), уменьшается с уменьшением концентрации. В результате происходит отставание в добыче нефти, даже если предельная нефтеотдача остается незатронутой. Этот аргумент означает, что концентрация должна быть настолько большой, насколько это возможно, а размер оторочки должен быть соответственно мал. Но чрезмерно маленькие оторочки, по-видимому, будут чувствительны к дисперсивному смешиванию в пласте.

После того, как выбрана концентрация оторочки, из величины D_3 рассчитывают размер оторочки, как упомянуто в Разделе 9-11. Чтобы удовлетворить условию удерживания, размер оторочки, исходя из порового объема, который может быть охвачен заводнением, должен быть несколько больше, чем удерживание. Насколько больше – это зависит от экономических соображений и характеристики пласта. (Графический метод см. у Джоунса, 1972.)

Поддержание хорошего коэффициента охвата по объему

Рис.9-33 подтверждает, что невозможно преувеличить значение этого вопроса, особенно, что касается буферной оторочки, регулирующей подвижность.

Агентом, регулирующим подвижность в оторочке, может быть полимер или нефть, как показано на Рис.9-13. Какой бы агент ни использовался, первостепенное значение имеет то, чтобы фронт вала оторочки – нефти был стойким с точки зрения вязкости, т.к. небольшие оторочки не выдерживают даже незначительного образования языков в результате разности вязкостей. Поэтому, нам нужна оторочка, менее подвижная, чем нефтяной вал, который она вытесняет. Чтобы обеспечить запас прочности при оценке подвижности нефтяного вала, для расчета регулирования подвижностей используйте минимум в кривых общей относительной подвижности (см. Раздел 3-3). Такие кривые (Рис.9-34) показывают, что минимум может быть существенно меньше общей относительной подвижности в любой конечной точке. Т.к. эти кривые подвержены гистерезису, важно, чтобы кривые относительной проницаемости для третичных заводнений замерялись в направлении возрастания нефтенасыщенности.

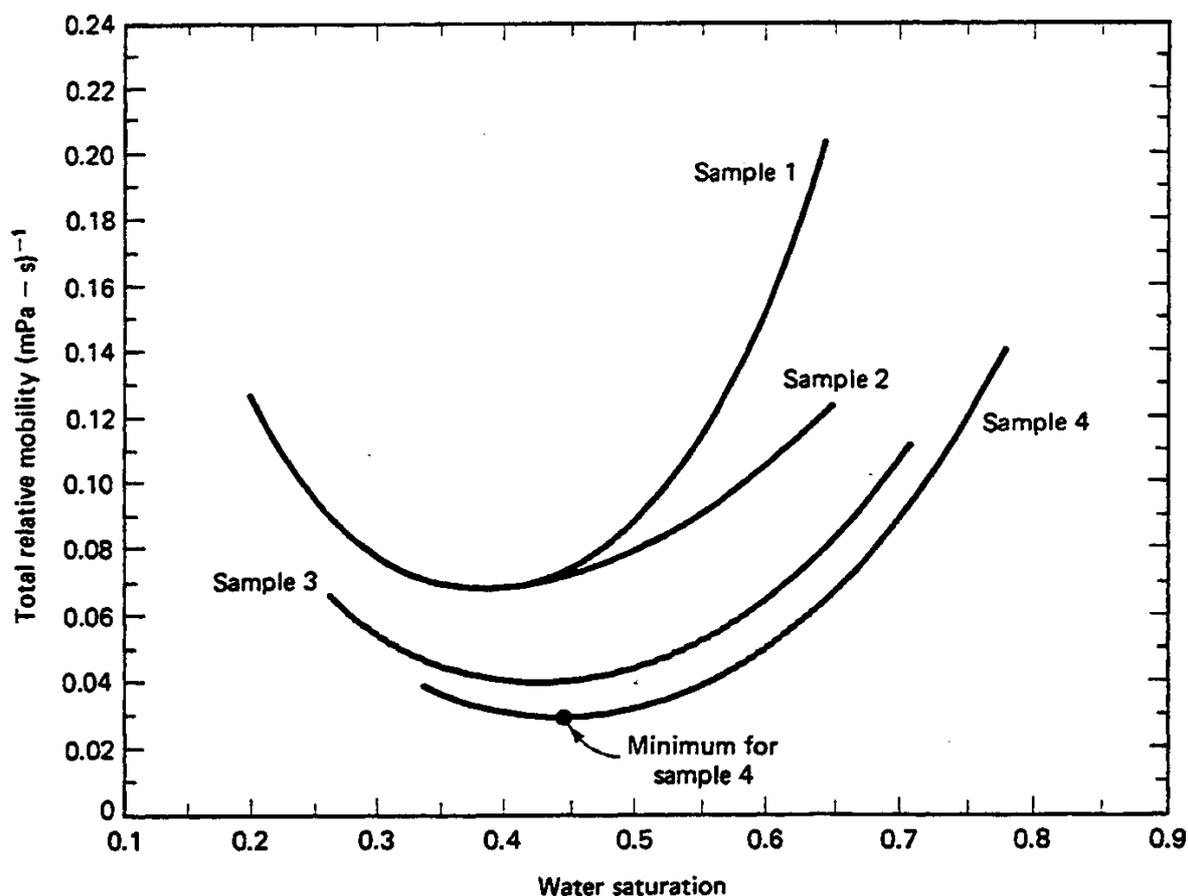


Рис.9-34 Общие относительные подвижности для образцов одного и того же пласта (Гогарти и др., 1970)

Подбор размера буферной оторочки, регулирующей подвижность, происходит так же, как и при полимерном вытеснении, которое мы рассматривали в Разделе 8-5. Здесь на самом пике буфера подвижность должна быть равна или меньше подвижности оторочки. Т.к. последняя зависит от степени разбавления нефти, подвижность буфера невозможно рассчитывать независимо от оторочки.

9-14 Упрощенный прогноз нефтеотдачи

В нескольких следующих параграфах мы опишем простую методику оценки кривых нефтеотдачи и зависимости скорости нефти от времени для процесса мицеллярно-полимерного заводнения. Т.к. межфазная активность может быть утрачена во многих отношениях, эта методика будет наиболее точной для процессов, которые несомненно соответствуют начальному замыслу, изложенному в Разделе 9-13. Эта методика состоит из двух этапов: оценки коэффициента нефтеотдачи в мицеллярно-полимерном заводнении и затем подбора состава по приемистости и движению отдельных фаз в многофазовом потоке для получения кривой зависимости скорости нефти во времени. (Более подробное описание методики см. у Пола и др., 1982.)

Коэффициент нефтеотдачи

Коэффициент нефтеотдачи E_R в третичном ($S_{2I} = S_{2R}$) мицеллярно-полимерном заводнении является произведением коэффициента охвата по объему E_V , коэффициента вытеснения E_D и эффективности буферной оторочки, регулирующей подвижность E_{MB}

$$E_R = E_D E_V E_{MB} \quad (9.14-1)$$

Каждая величина должна быть рассчитана самостоятельно.

Коэффициент вытеснения. Коэффициент вытеснения в мицеллярно-полимерном заводнении является предельным (независимым от времени) объемом вытесненной нефти, разделенной на объем проконтактировавшей нефти

$$E_D = 1 - \frac{S'_{2r}}{S_{2r}} \quad (9.14-2)$$

где S'_{2r} и S_{2r} - остаточная нефтенасыщенность в мицеллярно-полимерном и обычном заводнении, соответственно. S_{2r} должна быть известна, а S'_{2r} может быть получена по результатам лабораторного кернового заводнения, в котором применялась большая оторочка (без эффектов удерживания ПАВ). Низкие значения S'_{2r} указывают на успешное достижение хорошей межфазной активности в мицеллярно-полимерной оторочке. Если результаты кернового заводнения отсутствуют, S'_{2r} можно определить по кривой капиллярного осушения, используя «промысловое» капиллярное число (Лэйк и Поуп, 1978), исходя из средней скорости в ограниченном пяти-точечном элементе.

$$N_{vc} = \frac{0.565 g \sigma}{H_t \sqrt{A_p}} \quad (\text{безразмерное}) \quad (9.14-3)$$

Здесь q – объемная скорость закачки, а A_p – площадь элемента. Для примерного расчета предположим, что $\sigma = 1 \mu N / m$ в уравнении (9.14-3). Кривая капиллярного осушения, выбранная для оценки S'_{2r} , должна соответствовать, насколько это возможно, условиям пласта-кандидата.

Коэффициент охвата по объему. Коэффициент охвата по объему E_V – это объем проконтактировавшей нефти, разделенный на объем целевой нефти. E_V является функцией размера мицеллярно-полимерной оторочки t_{Ds} , удерживания D_3 и неоднородности, основанных на коэффициенте Дикстра-Парсонса V_{DP} .

Рассмотрим слоистую среду, изображенную на Рис.9-35, в которую закачали мицеллярно-полимерную оторочку размером t_{Ds} . Если поток распределяется по kh , и переток отсутствует, размер оторочки в слое ℓ равен

$$t_{Ds\ell} = t_{Ds} \left(\frac{k}{\phi} \right)_\ell \left(\frac{\bar{\phi}}{\bar{k}} \right) = t_{Ds} F'_\ell \quad (9.14-4)$$

куда уравнение (9.14-4) ввело производную кривой пропускная способность – аккумулирующая способность (кривая F-C), впервые рассмотренную в Разделе 6-3. Помимо осуществления непрерывного распределения проницаемость – пористость, использование кривых F-C предполагает, что слои расположены в убывающем порядке (k/ϕ) . Если в конкретном слое m $t_{Ds_m} > D_3$, то слой будет полностью охвачен заводнением; в противном случае коэффициент охвата слоя по объему будет пропорционален t_{Ds_m} / D_3

$$E_{V_m} = \begin{cases} 1, & t_{Ds_m} > D_3 \\ \frac{t_{Ds_m}}{D_3}, & t_{Ds_m} \leq D_3 \end{cases} \quad (9.14-5)$$

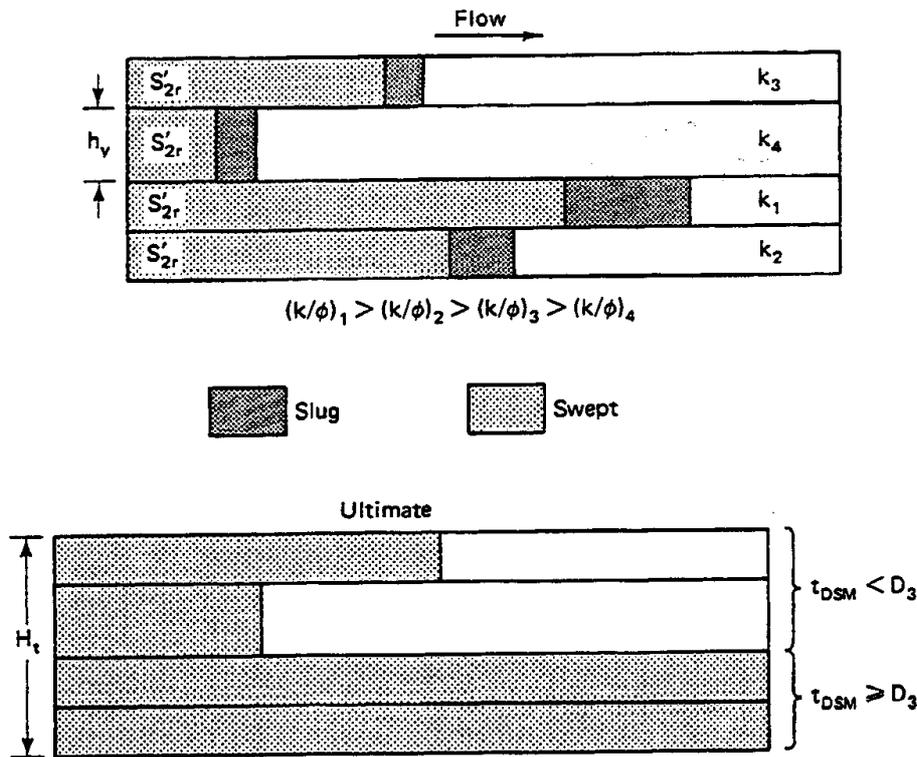


Рис.9-35 Схематическое изображение охвата слоистой среды мицеллярно-полимерной оторочкой

Рис.9-35 показывает это распределение. E_{V_m} , суммированное по слоям $n = 1, \dots, m, \dots, N_L$ после взвешивания по $(\phi h)_m$ дает

$$E_V = C_m + \frac{t_{Ds}}{D_3} \cdot (1 - F_m) \quad (9.14-6)$$

Чтобы рассчитать E_V при известных t_{Ds} , D_3 и кривой F-C, начните с нахождения слоя m , где $t_{Ds} = D_3$. Это определяет координаты $(F, C)_m$ в уравнении (9.14-6), определяющие E_V . Уравнения (6.3-11) и (6.3-12) устанавливают зависимость между кривыми F-C, коэффициентом неоднородности H_K и V_{DP} при логарифмически нормальном непрерывном распределении проницаемости; таким образом, E_V в уравнении (9.14-6) может быть напрямую связан с V_{DP} . Эта зависимость показана на Рис.9-36. V_{DP} можно оценить по результатам геологического исследования, сопоставления с предшествующим обычным заводнением и по данным кернового анализа (см. Таблицу 6-1). D_3 получают из уравнения (9.10-6).

Эффективность буферной оторочки, регулирующей подвижность. Эффективность буферной оторочки, регулирующей подвижность E_{MB} , является функцией E_V и V_{DP}

$$E_{MB} = (1 - E_{MBe}) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-0.4 \cdot t_{DMB}}{E_V^{1.2}}\right) \right] + E_{MBe} \quad (9.14-7a)$$

и

$$E_{MBe} = 0.71 - 0.6 \cdot V_{DP} \quad (9.14-7b)$$

где E_{MBe} - эффективность буфера, регулирующего подвижность, экстраполированная до $t_{DMB}=0$, а t_{DMB} - его объем, выраженный в долях V_{pf} . Уравнение (9.12-7) было получено численным моделированием.

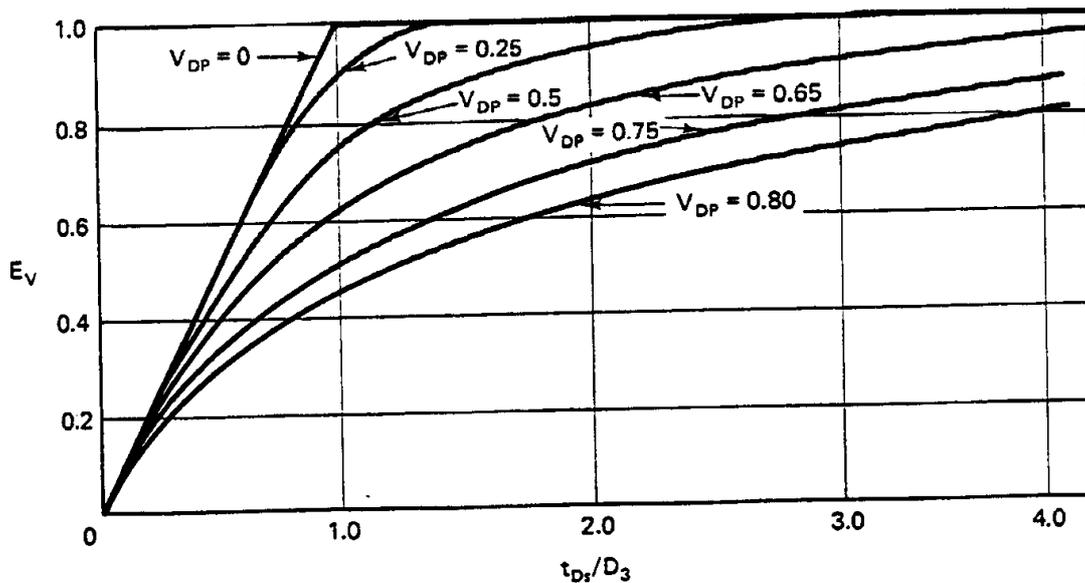


Рис.9-36 Влияние отношения размера оторочки к удерживанию на коэффициент охвата по мощности (Пол и др., 1982)

Коэффициент нефтеотдачи E_R теперь следует из уравнения (9.14-1), его правильность можно проверить по Рис.9-33.

Расчет графика зависимости скорости нефти от времени

Функция добычи (скорость нефти q_2 в зависимости от времени) основана на E_R и следующей методике. Мы предполагаем, что безразмерная функция добычи графически может быть представлена в виде треугольника при добыче нефти, начинающейся, когда прибывает нефтяной вал. С этого момента q_2 линейно возрастает до пикового (максимального) количества нефти вплоть до момента, когда происходит прорыв ПАВ, и затем линейно снижается до момента полного охвата. Треугольная форма диктуется неоднородностью пласта.

Первый этап заключается в расчете безразмерного времени прорыва нефтяного вала и ПАВ для заводнения в условиях однородной среды

$$t_{D_B} = \left(\frac{S_{2B} - S_{2I}}{f_{2B} - f_{2I}} \right) \cdot t_{D_S} \quad (9.14-8a)$$

$$t_{D_S} = 1 + D_3 - S_{2r}' \quad (9.14-8b)$$

где t_{D_B} – безразмерное время прибытия нефтяного вала, а t_{D_S} – время прибытия ПАВ. S_{2B} и f_{2B} можно определить, исходя из упрощенной теории движения отдельных фаз в многофазовом потоке (см. Раздел 9-10), или непосредственно из результатов лабораторных опытов.

Вторым этапом является корректировка этих величин для неоднородности выбранного для заводнения пласта, с помощью коэффициента неоднородности H_K , определяемого в уравнении (6.3-11).

Откорректированное время прорывов теперь равно

$$\hat{t}_{D_B} = \frac{t_{D_B}}{H_K} \quad (9.14-9a)$$

$$\hat{t}_{D_s} = \frac{t_{D_s}}{H_K} \quad (9.14-9b)$$

а пиковое количество нефти f_{2pk} равно

$$\hat{f}_{2pk} = \frac{\left(H_K - H_K \cdot \left(\frac{t_{D_B}}{t_{D_s}} \right)^{1/2} \right)}{H_K} \cdot f_{2B} \quad (9.14-10)$$

Значок $\hat{\quad}$ изображает величину в слоистой среде.

Окончательным этапом является преобразование безразмерной функции добычи в зависимость скорости нефти q_2 от времени t . Это следует из

$$q_2 = q \cdot \hat{f}_2 \quad (9.14-11a)$$

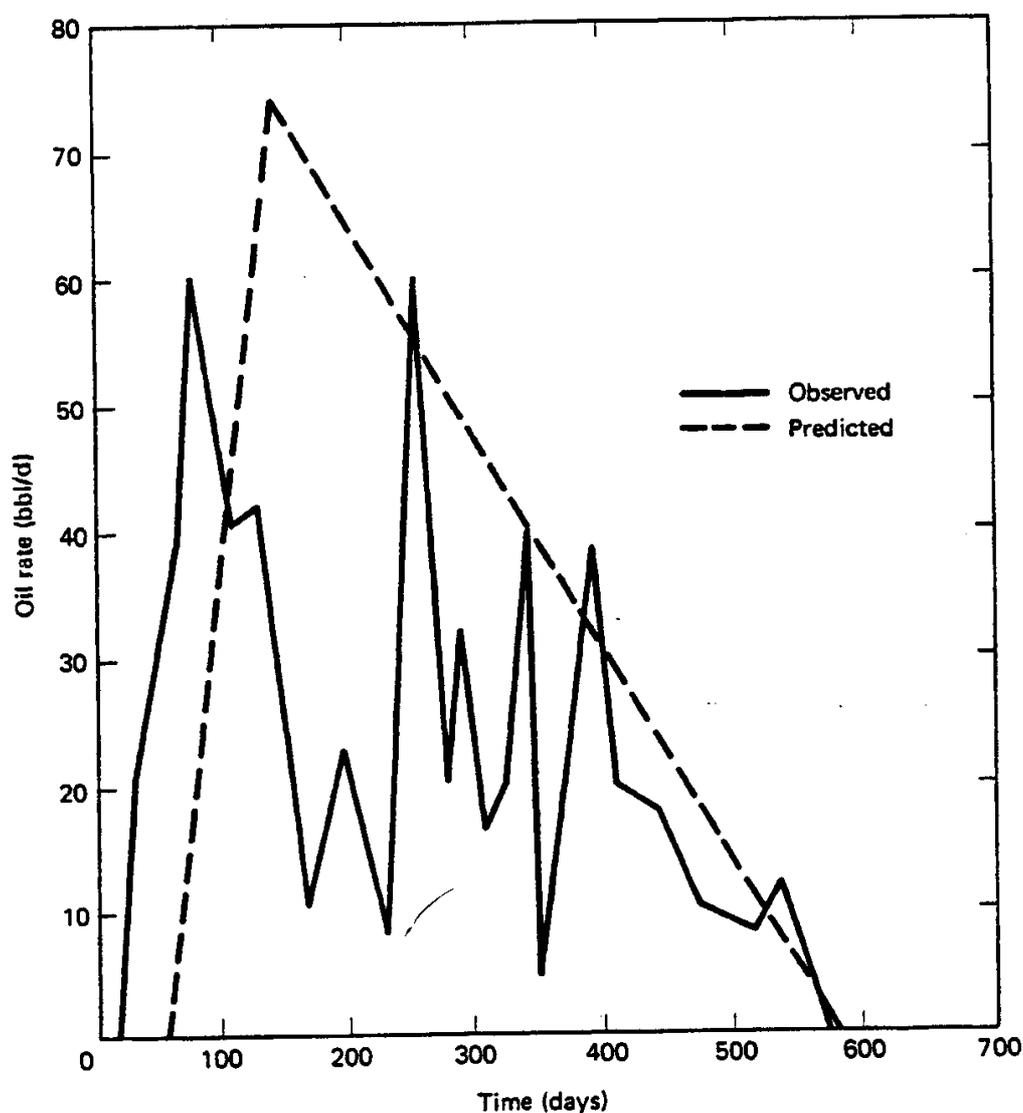


Рис.9-37 Сравнение прогнозной и реальной зависимости скорости нефти от времени в мицеллярно-полимерном заводнении на участке Слосс (Пол и др., 1982)

$$t = \frac{V_{pf} \cdot \hat{t}_D}{q} \quad (9.14-11b)$$

Здесь \hat{f}_2 и \hat{t}_D - любые точки на треугольной кривой нефтеотдачи, которая начинается в $(\hat{t}_{DB}, 0)$, доходит до максимума в $(\hat{t}_{Ds}, \hat{f}_{2pk})$ и заканчивается в $(\hat{t}_{Dsw}, 0)$. \hat{t}_{Dsw} - безразмерное время при полном вытеснении нефти, выбирается для того, чтобы сделать площадь под кривой $\hat{f}_2 - \hat{t}_D$ равной E_R

$$\hat{t}_{Dsw} = \hat{t}_{DB} + \frac{2E_R \cdot S_2}{\hat{f}_{2pk}} \quad (9.14-12)$$

На Рис.9-37 дается сравнение результатов, полученных при использовании этой методики, с результатами, полученными в опытном мицеллярно-полимерном заводнении, проводившемся на участке Слосс.

9-15 Заключительные комментарии

По количеству требуемых проектных решений мицеллярно-полимерное заводнение является наиболее сложным процессом повышения нефтеотдачи. Эта сложность, наряду с неоднородностью пласта и необходимостью довольно больших капиталовложений, делают мицеллярно-полимерное заводнение процессом с высокой степенью риска. Поэтому в последние годы отмечается падение интереса к этому процессу. Однако потенциал у этого процесса очень большой, даже несколько выше, чем у термических методов, по крайней мере, в Соединенных Штатах. Кроме того, как полимерное, так и мицеллярно-полимерное заводнение, по-видимому, уникально подходит для пластов, содержащих легкую нефть, в изолированных частях мира.

Пласты, подходящие для мицеллярно-полимерного заводнения, содержат легкую нефть и нефть средней плотности, и имеют среднюю – высокую проницаемость. Т. к. приемистость имеет для данного процесса большое значение, также как и для полимерного заводнения, мы ищем пласты с достаточно большой глубиной залегания, которые выдержали бы высокие давления закачки, но не настолько глубокие, чтобы пластовые условия не вызывали термическую деструкцию. И, наконец, рассматриваемый процесс чувствителен к высокоминерализованной воде, хотя эта проблема до некоторой степени решается путем применения подходящего ПАВ/полимера и разработкой.

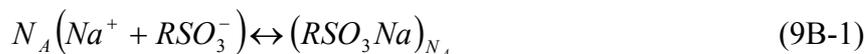
Важные темы данной главы – соединение межфазной активности с минерализацией и жесткостью воды через фазовое поведение, значение такого явления, как удерживание ПАВ и необходимость хорошего регулирования подвижностей. В некотором смысле критерии разработки, приведенные в Разделе 9-13, применимы ко всем процессам повышения нефтеотдачи, но, по-видимому, только в мицеллярно-полимерном заводнении все критерии должны применяться в равной степени строго. И, наконец, оценка нефтеотдачи при отборе (Раздел 9-14) является эффективным и в то же время простым средством оценки пригодности пласта и оценки риска, связанного с процессом.

ПРИМЕРЫ

9А. Единицы измерения мицеллярно-полимерного заводнения. Конкретное ПАВ нефтяного сульфоната имеет среднюю молекулярную массу 400кг/кг-молекулу, плотность 1.1г/см³ и мольное отношение моносальфоната к дисульфонату, равное 4. Выразите общую концентрацию ПАВ 5% (объем) водного раствора в г/см³, кг-мол/см³, мэкв/см³, мольных долях и долях массы.

9В. Равновесия ПАВ и агрегирование. Относительно простые модели могут многое сказать о равновесии ПАВ. В этой задаче ПАВ является моносulfонат.

(а) Агрегирование мономеров ПАВ в мицеллы в растворе NaCl можно изобразить следующей реакцией:



где N_A – число агрегирования. Используя определение общего количества ПАВ (мономер + мицеллы), выведите выражение для общей концентрации и концентрации sulfоната в мономере. Если константа равновесия для уравнения (9B-1) равна 10^{15} , а $N_A = 10$, определите критическую концентрацию мицеллообразования. Общая концентрация натрия равна $10,000 \text{ г/м}^3$.

(б) Рассмотрим более сложную ситуацию, когда в раствор NaCl добавляют раствор моносulfонатного ПАВ концентрацией $0.3175 \text{ кг-мол/м}^3$. В растворе NaCl может образоваться пять видов: мономер ПАВ (RSO_3^-), мицеллы ПАВ $[(RSO_3Na)_{N_A}]$, свободный натрий – ПАВ (RSO_3Na), выпавший в осадок натрий – ПАВ ($RSO_3Na \downarrow$) и свободный натрий (Na^+). Рассчитайте концентрацию каждого вида при общей концентрации натрия 100 г/м^3 . Используйте данные, приведенные в части (а) для реакции мономер – мицелла, примите константу равновесия для образования натрий-sulfонат, равной 3×10^6 , и результат растворения для осадка – 10^{-8} .

(в) Повторите расчет части (б), если общая концентрация натрия составляет $100,000 \text{ г/м}^3$. Какой вывод вы можете сделать относительно влияния высоких минерализаций на выпадение ПАВ в осадок?

9С. Фазовые отношения для правила правой руки. В Разделе 4.4 мы видели, что для расчетов равновесий пар-жидкость требовалось знание коэффициентов мгновенного испарения или значений K . Аналогичными величинами для правила правой руки являются *фазовые отношения*, определяемые как

$$R_{ik}^j = \frac{C_{ij}}{C_{kj}} \quad (9C-1)$$

для компонентов i и k . Почти весь расчет можно сформулировать в виде фазовых отношений. Предположим фазовое поведение II(-) типа в следующем:

(а) Покажите, что уравнения правила правой руки для бинодальной кривой (уравнение 4.4-23) и распределения компонентов (уравнение 4.4-24) можно записать как

$$R_{32}^j = A_H (R_{31}^j)^B, \quad j=2 \text{ или } 3 \quad (9C-2)$$

$$R_{32}^2 = E_H (R_{31}^3)^F \quad (9C-3)$$

(б) Мы можем переставить фазовые концентрации и фазовые отношения. Покажите, что условие совместимости $\sum_{i=1}^3 C_{ij} = 1$ сводится к

$$C_{ij} = \left(\sum_{k=1}^3 R_{ki}^j \right)^{-1}, \quad j=2 \text{ или } 3 \quad (9C-4)$$

где $R_{ii}^j = 1$.

В двухфазных системах существует 18 фазовых отношений. Но только 4 из них независимы, т.к.

$$R_{ik}^j = (R_{ki}^j)^{-1} \text{ и } R_{ik}^j = \frac{R_{im}^j}{R_{km}^j} \quad (9C-5)$$

По согласованию с правилом фаз, определение одной из величин определяет другие и все концентрации фаз с помощью уравнения (9С-4). Определите концентрации фаз при $R_{31}^2 = 5$. Возьмите $A_H = 0.5$, $B_H = -1.5$, $E_H = 0.137$ и $F_H = 0.65$. Обратите внимание на то, что фазовые отношения для микроэмульсионной фазы такие же, как и параметры солубилизации.

9D. Применение уравнений правила правой руки

(а) Используя параметры правила правой руки $A_H = 2$, $B_H = -0.5$, $E_H = 600$ и $F_H = 2.3$, постройте бинадальную кривую и, по крайней мере, две рабочие линии на треугольных координатах. Расчет в двухфазных областях требует дополнительного ограничения сверх тех, что были упомянуты в Примере 9С. Ограничивающим условием здесь является уравнение рабочей линии

$$S_1 = \frac{C_i - C_{i3}}{C_{i1} - C_{i3}}, \quad j=1, 2 \text{ или } 3 \quad (9D-1)$$

для систем II(+) типа (где $j = 1$ заменено на $j = 2$ в уравнениях [9С-2] и [9С-3]). Любые два из них могут использоваться для расчета, например

$$\frac{C_1 - C_{13}}{C_{11} - C_{23}} - \frac{C_2 - C_{23}}{C_{21} - C_{23}} = f \quad (9D-2)$$

Быстрота расчета заключается в подборе правильного фазового отношения (см. Пример 9С), так что $f = 0$ при известном C_i .

(б) Рассчитайте составы и количества каждой присутствующей фазы, если общий состав C_i равен (0.45, 0.45, 0.1).

9E. Быстрый расчет двухфазной области (точка полного смешения частично смешивающихся жидкостей находится на вершине диаграммы)

В системе II(+) типа, когда точка полного смешения частично смешивающихся жидкостей находится на вершине, изображающей воду, мы имеем $C_{11} = 1$, а $C_{21} = C_{31} = 0$. Уравнение (9.7-9), представляющее распределение фаз, теперь становится ненужным, как и уравнение бинадальной кривой (9.7-5) для водной фазы. Все представление правила правой руки сводится к

$$\frac{C_{33}}{C_{23}} = A_H \cdot \left(\frac{C_{33}}{C_{13}} \right)^{B_H} \quad (9E-1)$$

(а) Покажите, что уравнение рабочей линии для этого частного случая сводится к

$$C_{23} = C_{33} \cdot \left(\frac{C_2}{C_3} \right) \quad (9E-2)$$

$$C_{13} = 1 - C_{33} \cdot \left(\frac{(1 - C_1)}{C_3} \right) \quad (9E-3)$$

что выражает концентрацию микроэмульсионных фаз в виде отношений друг к другу.

(б) Покажите, что уравнения (9E-1) – (9E-3) могут быть использованы для явного определения концентрации ПАВ в микроэмульсионной фазе как

$$\frac{1}{C_{33}} = \frac{1 - C_1}{C_3} + \left(\frac{C_3}{A_H \cdot C_2} \right)^{-1/B_H} \quad (9E-4)$$

(с) При общем составе, равном $C_i = (0.45, 0.45, 0.1)$ с помощью уравнения (9E-4) определите фазовый состав и насыщенность водной фазы. Возьмите $A_H = 2$, а $B_H = -0.5$.

(d) Сравните результаты части (c) с результатами части (b) Примера 9D. Какой вывод вы можете сделать относительно определения этого фазового поведения по точке полного смешения частично смешивающихся жидкостей, расположенной в одной из вершин тройной диаграммы?

9F. Расчеты равновесия по упрощенному фазовому поведению. В нижеследующем используйте упрощенные представления правила правой руки при $V_H = -1$ и $F_H = 1$. Кроме того, примите левую и правую координаты нефти точки полного смешения частично смешивающихся жидкостей, равными 0.05 и 0.95, соответственно; верхняя часть бинодальной кривой при низкой, оптимальной и высокой минерализации соответственно равна 0.2, 0.1 и 0.2; а нижний и верхний пределы эффективной минерализации составляют 0.06% и 1.4% NaCl. Оптимальная минерализация находится посередине между этими двумя значениями. Сделайте все расчеты при минерализации 0.08% NaCl, при которой фазовое окружение представлено системой III типа.

(a) Рассчитайте параметр правила правой руки A_H и координаты двух точек полного смешения частично смешивающихся жидкостей и инвариантной точки.

(b) Постройте бинодальную кривую и трехфазную область на тройной диаграмме.

(c) Рассчитайте фазовые концентрации и насыщенности при общей концентрации $C_i = (0.65, 0.3, 0.05)$.

(d) Повторите часть (c) при общей концентрации $C_i = (0.44, 0.44, 0.12)$.

Покажите обе точки на диаграмме части (b).

9G. Фазовое поведение и межфазное натяжение. Рис 9G показывает нижнюю половину шести смесей ПАВ – вода – нефть. Эти диаграммы представлены в прямоугольной системе координат с сильно растянутой шкалой по вертикали. C_{Se} – это минерализация, выраженная в вес. % NaCl. В нижеследующем концентрация ПАВ составляет 0.05 объемных долей:

(a) Рассчитайте и постройте диаграммы объемных долей при соотношении воды и нефти равном 0.2, 1.0 и 5.

(b) При соотношении воды и нефти, равном 1, рассчитайте и представьте в виде таблицы параметры солубилизации.

(c) Используйте корреляцию, представленную на Рис.9-9, для того, чтобы преобразовать параметры солубилизации в межфазные натяжения. Постройте графики зависимости этих параметров солубилизации от минерализации и определите оптимальную минерализацию.

(d) Постройте графики зависимости межфазных натяжений, приведенных в части (c), от минерализации в полулогарифмическом масштабе. По межфазному натяжению определите оптимальную минерализацию и оптимальное межфазное натяжение.

(e) Сравните межфазные натяжения в частях (c) и (d) с минерализацией в средней точке. Последняя – это минерализация посередине между C_{Seu} и C_{Sel} .

9H. Построение кривых движения отдельных фаз для систем II(-) типа. На Рис.9H показаны кривые движения потока воды для мицеллярно-полимерной системы II(-) типа, для которой все рабочие линии простираются до общей точки $C_i^0 = (0.1, 1.1, 0)$.

(a) Рассчитайте и постройте график профиля общей концентрации воды (C_1) при прорыве нефтяного вала и выходящем потоке воды (F_1) для следующих случаев:

Случай	Закачиваемый состав (J)		Исходный состав (I)	
	C_2	C_3	C_1	C_2
1	0	0.10	0.66	0.34
2	0.97	0.03	0.66	0.34
3	0	0.10	0.20	0.80

Для всех случаев вытеснение удовлетворяет условиям допущений движения отдельных фаз, ПАВ не удерживается проницаемой средой, а закачка ПАВ непрерывная.

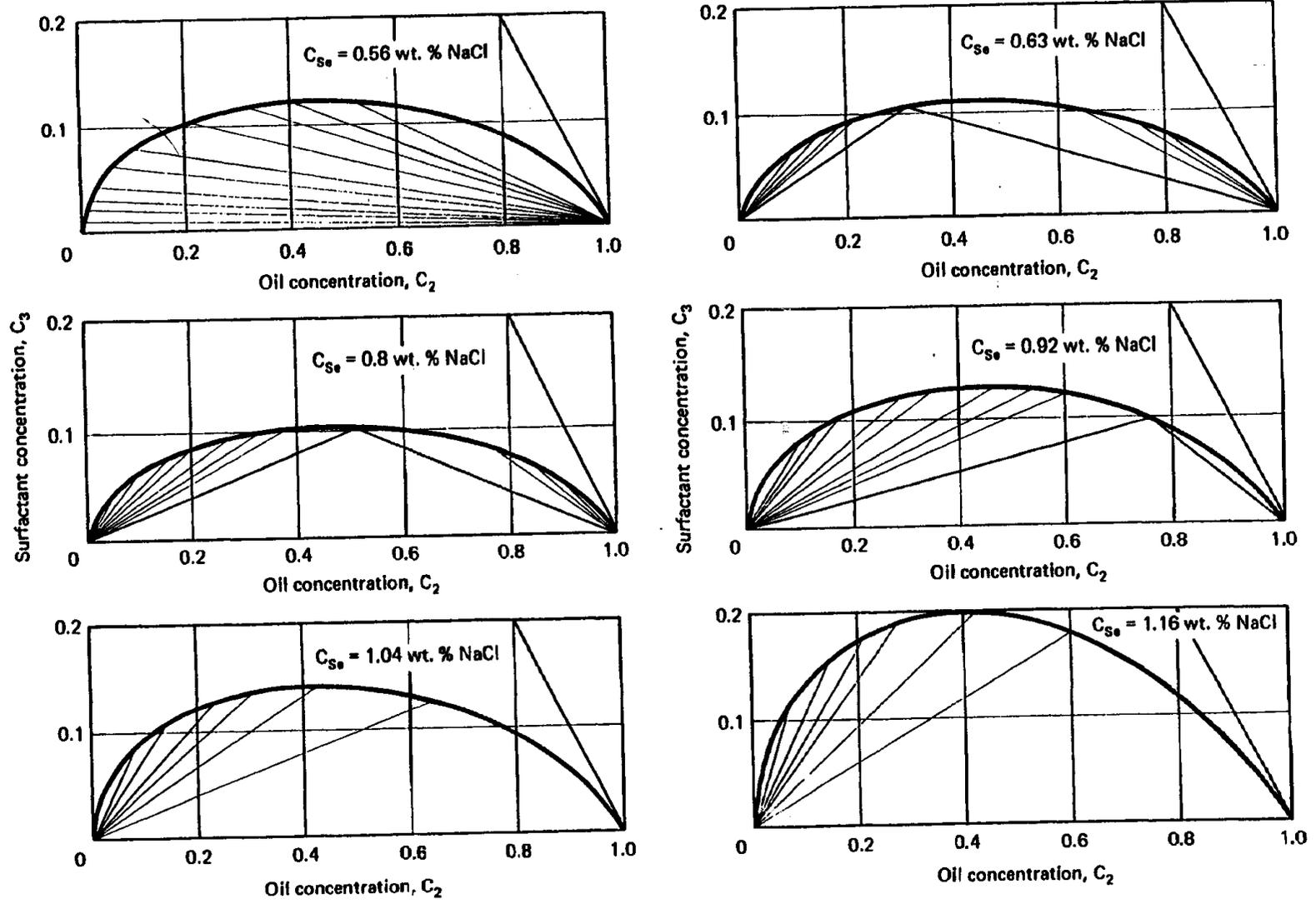


Рис.9G Тройные диаграммы при разных минерализациях (Энглисон, 1981)

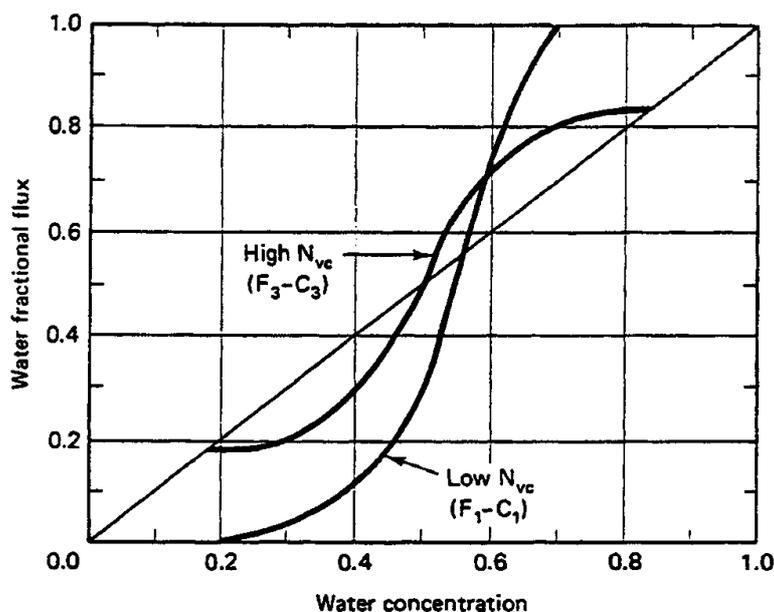


Рис.9Н Движение водного потока для Примера 9Н

Все закачанные составы, кривые движения отдельных фаз которых показаны на рисунке, располагаются на продолжении рабочих линий.

(b) На профилях концентрации воды части (a), изобразите (расчет не требуется) профиль насыщенности микроэмульсионной фазы S_3 .

(c) На диаграмму изменения водного потока части (a) нанесите изменение потока ПАВ C_3 .

9I Движение двухфазной системы II(-) типа. Для нижеследующего используйте данные Рис.9G и 9-9. Возьмите концентрацию закачиваемой оторочки, не содержащей нефти, равной 0.05 объемной доли ПАВ, а минерализацию постоянной – 0.56% NaCl. ПАВ находится в идеальной смеси. Кривые относительной проницаемости при низком N_{vc} даются как

$$\begin{array}{lll} S_{2r} = 0.3, & k_{r2}^0 = 0.8, & n_2 = 1.5 \\ S_{3r} = 0.2, & k_{r3}^0 = 0.1, & n_3 = 5 \end{array}$$

Фаза 3 - вода при N_{vc} . Вытеснение происходит при приведенной скорости, равной 10 $\mu\text{м/сек}$. Вязкости микроэмульсии, нефти и воды составляют 2, 5 и 1 мПа-сек. Среда – горизонтальная. Используйте Рис.3-19 в качестве кривой осушения капилляра.

(a) Рассчитайте и постройте кривые относительных проницаемостей, соответствующие рабочим линиям в начальных условиях и в условиях закачки. Используйте относительные проницаемости при высоком N_{vc} (уравнения 9.9-1 и 9.9-2).

(b) Рассчитайте и постройте кривые движения микроэмульсии вдоль двух рабочих линий, которые даются в части (a).

(c) Постройте диаграмму время – расстояние и профиль состава для этого вытеснения в момент прорыва нефтяного вала для случая непрерывной закачки ПАВ. Используйте упрощенный анализ движения отдельных фаз (уравнения 9.10-5 – 9.10-9). Примите $D_3 = 0.1$.

9J. Оторочки и упрощенное движение отдельных фаз. Для нижеследующего используйте упрощенное движение отдельных фаз, представленное уравнениями (9.10-5) – (9.10-9). Вытеснение представляет собой постоянное фазовое окружение II(-) типа, состоящее из оторочки ПАВ, не содержащей нефти, за которой следует оторочка полимера. Вязкости водной, нефтяной и микроэмульсионной фаз равны 1, 5 и 10 мПа-сек, соответственно, а данные относительной проницаемости при низком и высоком N_{vc} следующие:

	Олеиновая фаза			Микроэмульсионная фаза		
	S_{2r}	k_{r2}^0	n_2	S_{3r}	k_{r3}^0	n_3
Низкое N_{vc}	0.3	0.8	1.5	0.2	0.1	5.0
Высокое N_{vc}	0.05	0.9	1.2	0.1	0.6	2.5

(a) Определите вязкость полимерного раствора в буферной оторочке, регулирующей подвижность, если соотношение подвижностей между оторочкой ПАВ и полимерной оторочкой составляет 0.8. Полимер не вызывает уменьшение проницаемости.

(b) Рассчитайте и постройте три кривые движения водной фазы (вода – нефть, микроэмульсия – нефть, полимерный раствор – нефть) по данным части (a) и вязкости полимерного раствора.

(c) Определите минимальный размер оторочки, необходимый для полного охвата одномерной среды оторочкой. Примите $D_3 = 0.2$, а $D_4 = 0.1$. Полимер в оторочке отсутствует.

(d) Рассчитайте и постройте диаграмму время – расстояние, если размер оторочки составляет половину того, что было рассчитано в части (c).

(e) Рассчитайте и постройте профили насыщенности при $t_D = 0.3$ и 0.8 для условий части (d).

9К. Движение отдельных фаз при использовании оторочки, растворимой в нефти. Для этого примера предположим, что вытеснение представлено постоянным фазовым окружением II(+) типа ($j=1$ или 3) с точкой полного смешения частично смешивающихся жидкостей, расположенной в водном углу на тройной диаграмме. Теперь ПАВ растворяется преимущественно в oleиновой фазе.

(a) Покажите, что удельная скорость ПАВ аналогична уравнению (9.10-5)

$$v_{\Delta C_3} = \frac{1 - f_1}{1 - S_1 + D_3} \quad (9K-1)$$

а насыщенность нефтяного вала дается решением

$$v_{\Delta C_2} = \frac{C_{2j} \cdot f_1^S - f_{1B}^S - C_{3j}}{C_{2j} \cdot S_1 - S_{1B} - C_{3j}} = \frac{1 - f_1^S}{1 - S_1 + D_3} \quad (9K-2)$$

(b) Покажите графическое решение уравнения (9K-2) на графике движения водной фазы. Какое влияние оказывает закачиваемая концентрация нефти на насыщенность нефтяного вала? Дайте этому физическое обоснование.

(c) Рис 9К показывает движение отдельных фаз в условиях высокого и низкого N_{vc} для конкретного вытеснения. По этим кривым рассчитайте и постройте профиль насыщенности oleиновой фазы при $t_D = 0.5$. Примите $D_3 = 0.1$ при непрерывной закачке ПАВ.

9Л. Определение размера предварительной промывки. Ниже приведен состав исходной пластовой воды и возможного раствора, используемого для предварительной промывки:

Вид	Пластовая вода (I), мэв/см ³	Предварительная промывка (J), мэв/см ³
Na ⁺	0.02	0.01
Ca ²⁺	0.06	0.005
Cl ⁻	0.08	0.015

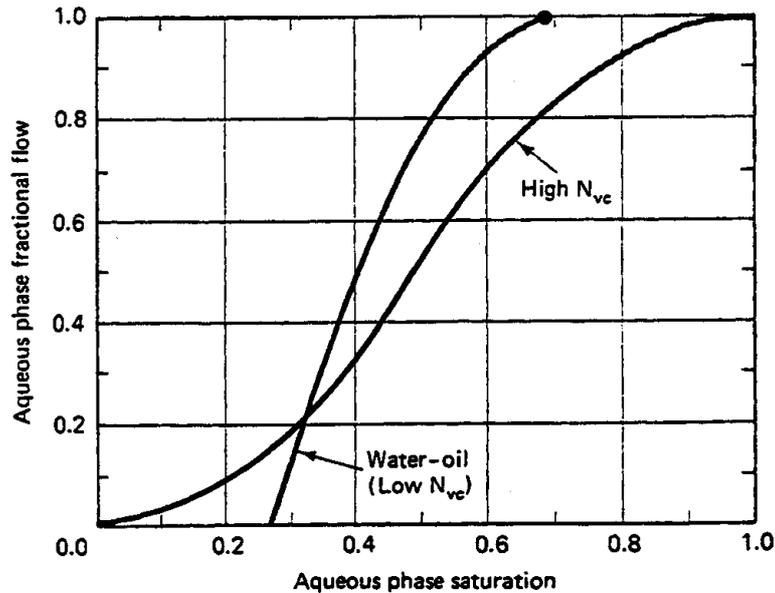


Рис.9К Кривые движения водной фазы для Примера 9К

Способность пласта к катионообмену составляет $Z_v = 0.05$ мэкв/см³ порового объема. Катионообмен удовлетворяет условию уравнения (9.11-3) при $K_N = 0.1$. Предположим однофазное течение идеального раствора, который содержит только виды, упомянутые выше.

(a) Изобразите это вытеснение на композиционном пространстве, как показано на Рис.9 –25(a).

(b) Определите количество поровых объемов жидкости J , требуемое для уменьшения концентрации ионов кальция в выходящем потоке до закачиваемой величины. Какой процент глин находится в данный момент в виде кальция?

(c) Рассчитайте и постройте для этого вытеснения диаграмму время – расстояние.

(d) Скажите, думаете ли вы, что это было бы эффективной предварительной промывкой для мицеллярно-полимерного заводнения.

9М. Значение регулирования подвижностей для мицеллярно-полимерных заводнений. В отсутствии других данных, относительные проницаемости при высоком N_{vc} , полученные для системы II(-) типа, для водной фазы можно аппроксимировать прямыми линиями через точки $(S'_{3r}, 0)$ и $(1 - S'_{2r}, k'_{r3})$, а

для oleиновой фазы – через точки (S'_{3r}, k'_{r2}) и $(1 - S'_{2r}, 0)$.

(a) Постройте две кривые движения водной фазы ($j=3$) вязкостью 5 и 50 мПа-сек при высоком N_{vc} .

Возьмите $\mu_2 = 5$, $\mu_3 = 0.8$ мПа-сек, $S'_{3r} = 0.15$, $S'_{2r} = 0.05$, $(k'_{r3}) = 0.8$, $a(k'_{r2}) = 0.6$. Среда не имеет наклона.

(b) Используя относительные проницаемости Эль Дорадо, представленные на Рис.8L, покажите воздействие хорошего регулирования подвижностей на мицеллярно-полимерное заводнение, рассчитав профили нефтенасыщенности для двух случаев, рассмотренных в части (a) при $t_D = 0.3$. Отставание фронта продвижения $D_3 = 0.16$. Закачка водного ПАВ производится в непрерывном режиме.

9Н. Прогнозирование рабочих характеристик. Используйте информацию, приведенную ниже, для оценки нефтеотдачи по проекту мицеллярно-полимерного заводнения. На Рис 9К представлены соответствующие данные относительной проницаемости по воде и нефти.

(a) Определите коэффициент вытеснения E_D в зоне, охваченной заводнением, если скорость закачки на элемент составляет 65 м³/сутки. Площадь элемента составляет 8.1 гм², мощность пласта – 2м. Примите межфазное натяжение равным 1μН/м, а для несмачивающей фазы используйте кривую капиллярного осушения, приведенную на Рис.3-19.

(b) Рассчитайте объемный коэффициент охвата E_V . Примите коэффициент Дикстра –Парсонса равным 0.5, размер оторочки – 0.16 и $D_3 = 0.12$.

(c) Исходя из вышеизложенного, определите коэффициент нефтеотдачи, если размер буферной оторочки, регулирующей подвижность, 0.8 объема пор.

(d) Рассчитайте и представьте графически темпы добычи нефти в зависимости от времени.