


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК
Кафедра фундаментальной математики и механики

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ
В ГЭК

Заведующий кафедрой
(к.ф.-м.н.)


19 июня 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
магистра

Критериальный анализ устойчивости фронтов вытеснения нефти водой

01.04.01 «Математика»

Магистерская программа «Вычислительная механика»

Выполнил работу
студент 2 курса
очной
формы обучения



Бояркин
Роман
Сергеевич

Научный руководитель
канд. физ.-мат. наук, профессор



Шевелев
Александр
Павлович

Консультант
канд. физ.-мат. наук, старший
преподаватель



Гильманов
Александр
Янович

Рецензент
канд. техн. наук,
ген. директор ООО «ИЦ-Проект»



Киселев
Данила
Алексеевич

Тюмень
2023 год

ВВЕДЕНИЕ

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в период до 2030 года потребление энергии в мире, несмотря на развитие технологий энергосбережения, вырастет в полтора раза, и 80% рынка будет по-прежнему приходиться на традиционные энергоносители. В России, как и во всем мире, практически не осталось «легкодоступной» нефти — разработка нефти и газа переносится в неисследованные регионы, такие как Сахалин или Арктика. Проекты становятся более требовательными с точки зрения технологий, навыков, рисков и капитала. Большинство крупных компаний предпочитают вырабатывать, так называемые, «активные» запасы, которые не требуют повышенных затрат. Сегодня на 30-40 % качественных запасов приходится 70-75% добычи, а на 60% трудных запасов — только 25-30% добычи. Структура запасов быстро ухудшается еще и потому, что большинство новых открытых месторождений — средние и мелкие, их рентабельность заведомо ниже, чем крупных.

Геологические запасы высоковязкой нефти превышают запасы легкой нефти, что приводит к более детальному изучению фильтрационно-емкостных свойств породы и свойств флюида. В процессе разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений прибегают к изучению смешивающего вытеснения водой нефти из порового объема породы. Важным условием сохранения постоянного дебита пластового флюида при водонапорном режиме эксплуатации залежи является поддержание пластового давления заводнением. При этом могут наблюдаться два типа процессов: устойчивое заводнение, при котором фронт вытеснения будет устойчивым (вытесняемый агент будет располагаться строго перед вытесняемым флюидом), и неустойчивое заводнение. Именно неустойчивый характер вытеснения свойственен некоторым трудноизвлекаемым запасам. К ним можно отнести высоковязкие нефти, нефтяные оторочки. При добыче таких углеводородов могут образовываться языки обводненности, из-за чего

вода будет преждевременно прорываться к добывающим скважинам.

С целью увеличения темпа отбора нефти из залежи и повышения ее нефтеотдачи проводят нагнетание рабочего агента в пласт для создания напорного режима, который имеет большую конечную нефтеотдачу по сравнению с режимами истощения.

Для месторождений Российской Федерации в большинстве случаев (порядка 80 %) для увеличения коэффициента извлечения нефти используется система поддержания пластового давления (ППД) путем закачки воды в пласт.

Применяются чаще все 2 метода воздействия на нефтяные пласты: законтурное и внутриконтурное заводнения.

Законтурное заводнение – технологический процесс ППД, при котором воду нагнетают в пласты через нагнетательные скважины, расположенные за внешним контуром нефтеносности. Эксплуатационные скважины в свою очередь находятся внутри контура нефтеносности.

Для увеличения коэффициента извлечения нефти и увеличения охвата залежи воздействием также применяется внутриконтурное заводнение, основой которого является разрезание залежи рядами нагнетательных скважин на несколько отдельных площадей. Крупные месторождения разрабатываются при комбинации законтурного и внутриконтурного заводнений.

При определении количества воды для закачки необходимо исходить из количества отобранной из залежи жидкости. Для системы ППД необходимо закачивать воды не менее объема отбора жидкости, а с учетом негерметичности площади месторождения с коэффициентом 1,1-1,5.

Давление нагнетания зависит от приемистости нагнетательных скважин и в основном поддерживается таким образом, чтобы забойное давление эксплуатационных скважин оставалось на уровне начального.

Призабойная зона пласта – это участок пласта, примыкающий к стволу скважины, в пределах которого изменяются фильтрационные характеристики

продуктивного пласта в период строительства скважин, их эксплуатации или ремонта.

Конфигурация, размеры и гидродинамические характеристики призабойной зоны изменяются в течение всего срока существования скважины. Они определяют гидравлическую связь скважины с пластом и существенно влияют на ее производительность.

Поэтому для анализа разработки углеводородов необходимо выявить тип процесса, который будет наблюдаться при добыче. Для этого необходимо определить, какие параметры в рассматриваемой системе «порода-флюид» оказывают влияние на устойчивость процесса вытеснения, и каким образом их можно изменить для формирования устойчивого вытеснения

При описании устойчивости чаще всего в силу своей простоты используется модель поршневого вытеснения, в которой вводится допущение, что перед фронтом подвижной фазой является только вода, а за фронтом – только нефть.

Однако результаты, приближенные к реальности, можно получить при рассмотрении менее идеализированной модели — модели двухфазного вытеснения, описанной в работах Баклея и Леверетта. При этом полагается, что перед фронтом вытеснения происходит фильтрация воды и нефти, а за фронтом вытеснения только нефть является подвижной фазой. В литературе обычно рассматриваются задачи фильтрации в наклонном пласте с учетом гравитационных сил, задачи с горизонтальным течением потоков, а также более сложные процессы, учитывающие баланс тепла на фронтах вытеснения.

Профессор Чарный И.А. считал, что: «Начиная с некоторого момента времени, распределение насыщенности может оказаться многозначным, аналогично, например, волнам Римана конечной амплитуды, которые изучаются в теории ударных волн. Очевидно, многозначность S_w (водонасыщенности) физически невозможна. Это говорит о том, что в зоне движения двухфазной жидкости образуются скачки. Многозначность в

волновых задачах механики сплошных сред обычно означает возможность существования разрывов или скачков искомых функций».

Развитие теории катастроф позволило решить проблему скачков, названных катастрофами в различных областях науки и техники. В теории катастроф динамические системы можно разбить на классы, внутри которых системы демонстрируют качественно схожее поведение, изменения фазового портрета могут осуществляться не только заменой фазовых переменных, но и с изменением параметров самой системы – например, параметра, от которого зависит «потенциал» системы. Резкое изменение свойств системы при малом изменении величины параметра называется бифуркацией. Всякая бифуркация сопровождается скачком системы из одного стационарного состояния в другое, что приводит к утрате порядка системой. Выбор пути развития после бифуркации в момент неустойчивости и направление эволюции системы становится непредсказуемым, поскольку конечный результат определяется случайным выбором на предшествующих этапах. Такого рода переходы описываются с помощью элементарных катастроф. Элементарная теория катастроф исследует изменения состояния равновесия при изменении управляющих параметров.

Существуют различные ресурсы закачиваемой воды, на практике чаще всего приходят к использованию грунтовых, пресных и артезианских вод. Грунтовые воды Западной Сибири содержат в себе различные взвеси, металлы, механические примеси, способные закольматировать призабойную зону пласта, что может негативно сказаться на процессе фильтрации воды в пласте. Засорение порового пространства частицами взвеси может привести к уменьшению пористости призабойной зоны и может значительно уменьшить фронт вытеснения нефти данной водой. Для описания процесса засорения пор горной породы вводится понятие кольматации. Вымывание данных частиц под действием потока воды называется суффозией, отсюда можем сделать вывод, что процессы кольматации и суффозии могут происходить одновременно, что не может не сказаться на фильтрационных свойствах

призабойной части пласта, так и на фронте вытеснения нефти водой.

В различных литературных источниках присутствует большой выбор моделей фильтрации жидкости, содержащей различные взвеси и механические примеси, в пористой среде. Довольно часто используют модель глубокой фильтрации в статьях [Barenblatt], [Boek], [Herzig], где применяется трехконтинуальная модель фильтрации различных суспензий, в качестве континуума используют несущую фазу, частицы взвеси и осажденные частицы. В данных работах предполагается, что интенсивность кольтматации будет пропорциональна потоку взвешенных частиц. Детальный обзор для описания интенсивности кольтматации частиц взвеси был описан в [Zamani], где была изучена зависимость проницаемости от концентрации элементов взвеси в закачиваемой воде. В представленных работах приводится модель параллельных проводящих каналов, где пористая среда рассматривается как среда, содержащая два вида каналов. Под каналами первого вида подразумевают каналы малого диаметра, которые могут только забиваться частицами взвеси, под каналами второго вида понимают каналы с большим диаметром, в которых элементы взвеси могут или осаждаться на поровых стенках канала, либо вымываться.

Из экспериментальных данных были получены выражения для критической скорости вымывания частиц, ниже которой частицы примеси не смогут вымываться, а при превышении её интенсивность суффозии становилась пропорциональной концентрации взвеси. В трудах [Rajagopalan] была предложена аналитическая зависимость коэффициента кольтматации в зависимости от размера частиц на основе представления пористого пространства в виде сферических коллекторов, но данное выражение может быть использовано лишь для определения захвата частиц поровым каналом, а не для полноценного определения коэффициента кольтматации.

Для более полного описания влияния явлений кольтматации и суффозии на призабойную зону пласта рассмотрим элементарный процесс вытеснения, который происходит в одномерном прямолинейном образце. Будем считать,

что образец является изотропной и однородной пористой средой, то есть обладает постоянной пористостью и проницаемостью, площадь поперечного сечения поставим достаточно малым, для того чтобы капиллярное давление и насыщенность фаз можно было считать постоянными по сечениям [Гиматудинов, с. 27]. Давление в фазах воды и нефти считаем одинаковыми, обе фазы считаем несжимаемыми, фазовые переходы отсутствуют, процесс вытеснения предполагаем изотермический.

В представленный образец, который был изначально заполнен нефтью, через нулевое сечение закачивается вода, в результате чего образуется зона совместного движения двух фаз. При совместном течении воды и нефти в образце хотя бы одна из фаз образует связную систему, граничащую со скелетом образца и частично с другой жидкостью. Характер смачивания образца водой имеет избирательный характер, так как площадь контакта каждой из фаз с породой много больше, чем площадь межфазного контакта.

Тогда можем сделать вывод, что больший вклад в сопротивление совместного вытеснения дает взаимодействие каждой фазы с твердым скелетом образца, соответственно, много меньший вклад в сопротивление движения даёт увлечение водой нефтью. Следует ожидать, что при течении только лишь одной фазы сопротивление будет отличаться от совместной фильтрации, расходы фаз будут зависеть от фильтрационно-емкостных свойств коллектора, насыщенностей фаз и градиента давления.

Таким образом, целью настоящей работы является выявление критериев образования устойчивого и неустойчивого процессов вытеснения, которые должны учитывать свойства самих флюидов и свойства рассматриваемой породы.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Определить критерии устойчивости вытеснения.
2. Решить задачу о вытеснении нефти водой для коллекторов в программном комплексе TNavigator.

ГЛАВА 1. ОБРАЗОВАНИЕ ЯЗЫКОВ ОБВОДНЕННОСТИ

Устойчивость водонефтяного фронта – это способность нефтяной залежи сохранять свои характеристики при добыче нефти и воды, то есть сохранять определенную степень герметичности и не допускать перемещения водонефтяного фронта в сторону пласта. Она является одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность добычи нефти и на ее экономическую целесообразность.

Водонефтяной фронт – это граница между зоной насыщенной нефтью и зоной насыщенной водой. При добыче нефти из залежей, вместе с нефтью извлекается также вода, которая вытесняет нефть из пористой структуры горных пород. Если водонефтяной фронт перемещается в сторону пласта, то это может привести к снижению добычи нефти и увеличению объема извлекаемой воды. Кроме того, перемещение водонефтяного фронта может привести к образованию языков обводненности и ухудшению качества добытой нефти.

Для того чтобы сохранить устойчивость водонефтяного фронта, необходимо проводить комплекс мероприятий по оптимизации процесса добычи нефти и контролю за состоянием залежей. Одним из таких мероприятий является использование технологий вторичного и третичного извлечения нефти, которые позволяют повысить эффективность добычи и снизить объем извлекаемой воды. Кроме того, необходимо проводить регулярный мониторинг состояния залежей и принимать меры по предотвращению перемещения водонефтяного фронта.

Таким образом, устойчивость водонефтяного фронта является важным фактором, влияющим на эффективность добычи нефти и на экономическую целесообразность этого процесса. Проведение комплекса мероприятий по оптимизации процесса добычи и контролю за состоянием залежей позволяет сохранять устойчивость водонефтяного фронта и обеспечивать эффективную добычу нефти.

Языки обводненности – это участки залежи, где содержание воды

значительно выше, чем содержание нефти. Образование языков обводненности происходит при вертикальном вытеснении нефти водой, когда вода перемещается вниз и вытесняет нефть из пористой структуры горных пород.

Образование языков обводненности приводит к снижению эффективности добычи нефти, так как объем извлекаемой воды увеличивается, а объем добытой нефти – уменьшается. Кроме того, языки обводненности могут привести к ухудшению качества добытой нефти, так как вода может содержать различные примеси и минералы, которые негативно влияют на свойства нефти.

Для предотвращения образования языков обводненности необходимо проводить комплекс мероприятий по оптимизации процесса добычи нефти и контролю за состоянием залежей. Одним из таких мероприятий является использование технологий вторичного и третичного извлечения нефти, которые позволяют повысить эффективность добычи и снизить объем извлекаемой воды. Кроме того, необходимо проводить регулярный мониторинг состояния залежей и принимать меры по предотвращению образования языков обводненности.

Таким образом, образование языков обводненности является негативным фактором, влияющим на эффективность добычи нефти. Проведение комплекса мероприятий по оптимизации процесса добычи и контролю за состоянием залежей позволяет предотвращать образование языков обводненности и обеспечивать эффективную добычу нефти.

Условие устойчивости фронта вытеснения – это условие, при котором происходит равновесие между силами, вызывающими движение фронта вытеснения, и силами, препятствующими этому движению.

Основными силами, вызывающими движение фронта вытеснения, являются силы капиллярного давления, которые возникают в результате различия поверхностных натяжений между флюидами и пористой

структурой горных пород. Силы, препятствующие движению фронта вытеснения, включают силы инерции, гравитации и вязкости.

Условие устойчивости фронта вытеснения зависит от ряда факторов, таких как скорость движения фронта, свойства флюидов и пористой структуры горных пород, а также наличие препятствий на пути движения фронта.

Если условие устойчивости фронта вытеснения не выполняется, то происходит неустойчивое движение фронта, что может привести к образованию языков обводненности и снижению эффективности добычи нефти.

Стандартная теория вытеснения в настоящее время не описывает явления, происходящие при заводнении пластов, в котором вытесняемый агент имеет значительно большую вязкость, чем вытесняемый флюид. В таком случае вследствие неустойчивости фронта вытеснения происходит образование языков обводненности, и вода начинает прорываться за фронт вытеснения. На рисунке 1.1 представлены сечения модели, состоящей из рыхлого песка, заводнение которой проводилось при отношении вязкости нефти к вязкости воды порядка 100.

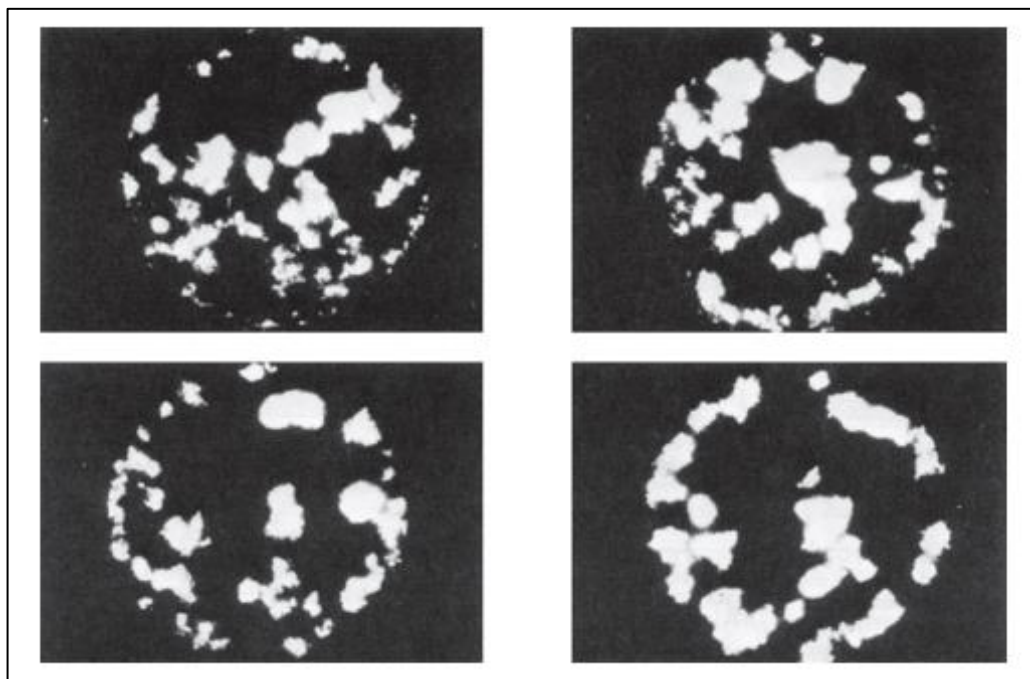


Рис. 1.1. Образование языков обводненности

В данном разделе рассмотрим два метода прогнозирования образования языков обводненности для случая вертикального вытеснения и вытеснения вдоль образца, расположенного под углом к горизонту.

Сначала обратимся к модели Хилла. В своей работе Хилл рассмотрел образование небольшого языка обводненности на плоской поверхности контакта жидкостей, обладающих различными вязкостями (μ_1 и μ_2) и плотностями (ρ_1 и ρ_2). На рисунке 1.2 представлено схематичное изображение языка длиной z , который распространяется от поверхности контакта.

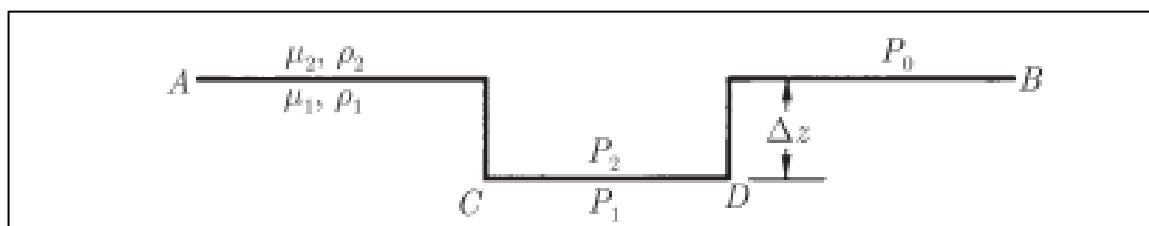


Рис. 1.2. Схематичное изображение языка обводненности на поверхности раздела фаз

Хилл полагал, что условие, при котором не будет происходить роста языка обводненности, заключается в том, что давление P_1 будет выше, чем давление P_2 . Если допустить, что жидкости при вытеснении с постоянной скоростью u подчиняются закону Дарси, то выражения для давлений можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} p_1 = p_0 + \rho_1 g \Delta z - \frac{\mu_1 u \Delta z}{k_1} \\ p_2 = p_0 + \rho_2 g \Delta z - \frac{\mu_2 u \Delta z}{k_2} \end{cases}, \quad (1.1)$$

где k_1 и k_2 – фазовые проницаемости воды и нефти соответственно.

Фронт вытеснения будет считаться устойчивым при выполнении (1.2):

$$p_1 - p_2 > 0 \quad (1.2)$$

Таким образом условие устойчивости фронта вытеснения можно записать так:

$$g(\rho_1 - \rho_2)\Delta z - \left(\frac{\mu_1}{k_1} - \frac{\mu_2}{k_2}\right)u\Delta z > 0 \quad (1.3)$$

Упрощая это уравнение, можно получить выражение для скорости фильтрации, при которой вытеснение устойчиво:

$$u < \frac{g(\rho_1 - \rho_2)}{\left(\frac{\mu_1}{k_1} - \frac{\mu_2}{k_2}\right)} \quad (1.4)$$

В своей работе Хилл сделал вывод, что стабилизация фронта вытеснения происходит в том случае, когда скорость вытеснения меньше некоторой критической скорости гравитационного дренирования.

Случай, при котором образец расположен под углом к горизонту, и поток флюида q направлен вдоль длины образца, рассмотрен в работе [3]. Схематично задача изображена на рисунке 1.3.

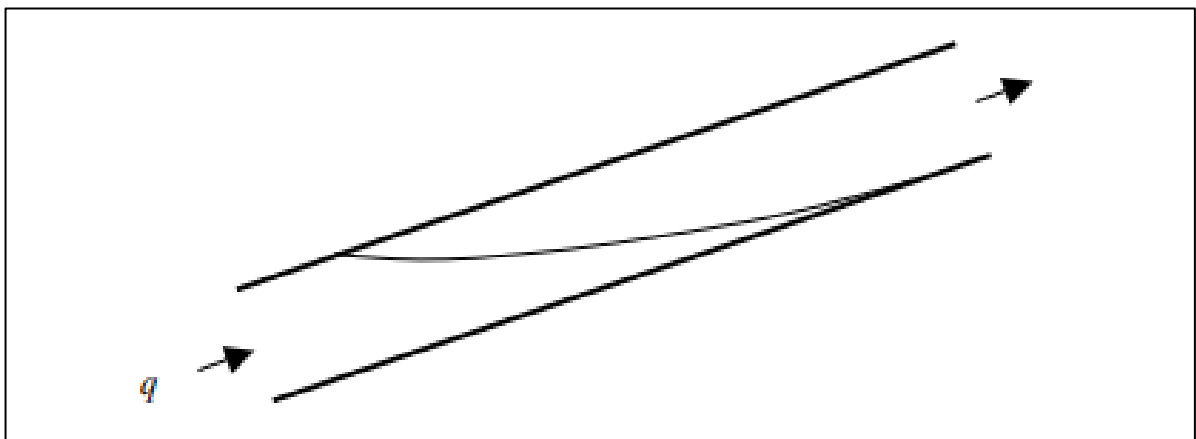


Рис. 1.3. Граница раздела фаз в наклонном образце

Граница раздела «нефть-вода» в данной системе очень зависит от гравитационных сил. Можно выделить два типа процессов:

1) вытеснении при малой скорости закачки, когда граница раздела горизонтальна (рисунок 1.4);

2) вытеснение при высокой скорости закачки, достаточной для того, чтобы поверхность раздела была параллельной направлению скорости закачки (рисунок 1.5).

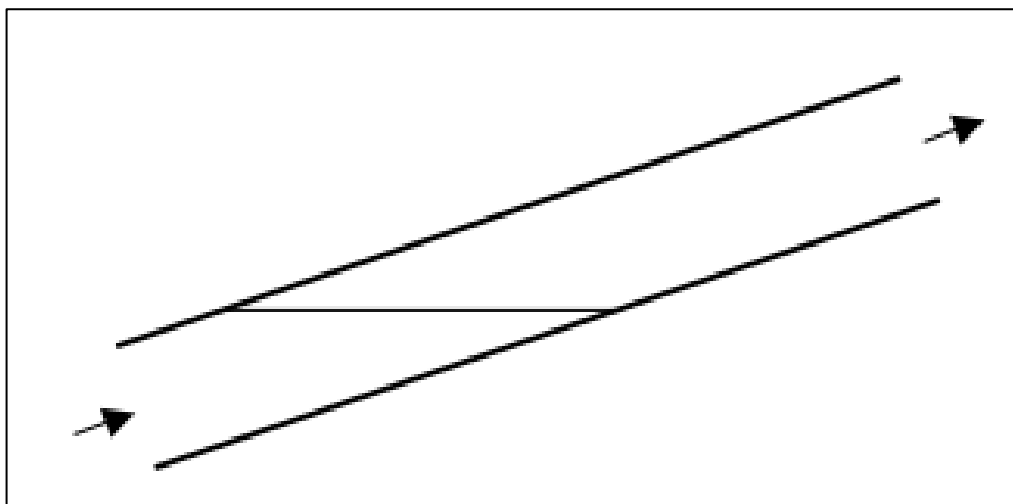


Рис. 1.4. Граница раздела фаз при низких фильтрационных скоростях

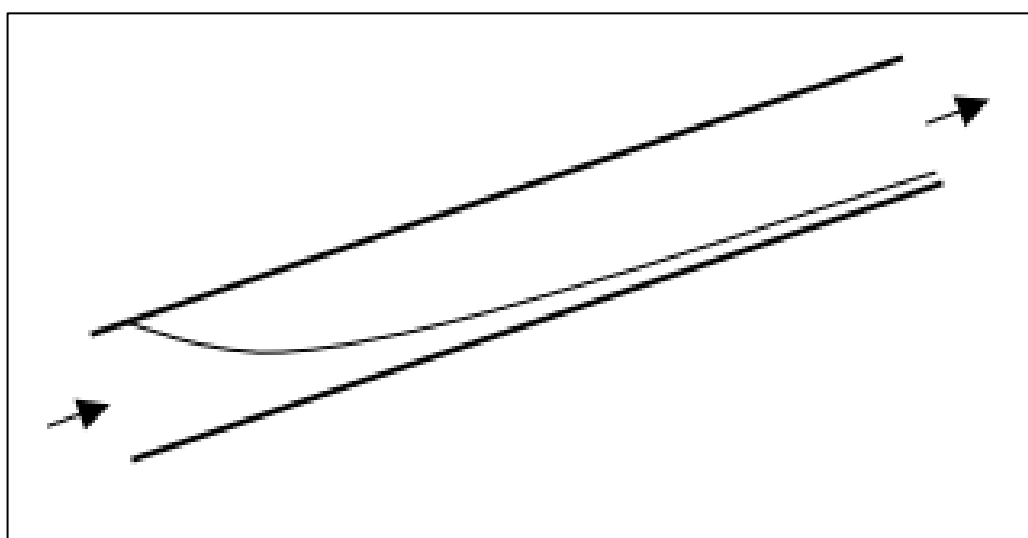


Рис. 1.5. Граница раздела фаз при высоких фильтрационных скоростях

При низкой скорости закачки вытеснение считается устойчивым, в случае высоких скоростей закачки вытеснение неустойчиво. Происходит образование языков обводненности, так как менее вязкая жидкость продвигается по дну образца, минуя более вязкую. Для анализа этой системы были приняты следующие допущения:

- 1) рассматривается поршневое вытеснение;
- 2) фильтрация одномерная;
- 3) капиллярное давление не учитывается;
- 4) порода и рассматриваемые флюиды несжимаемы.

Следующим шагом в анализе является рассмотрение условия баланса давлений на границе раздела фаз.

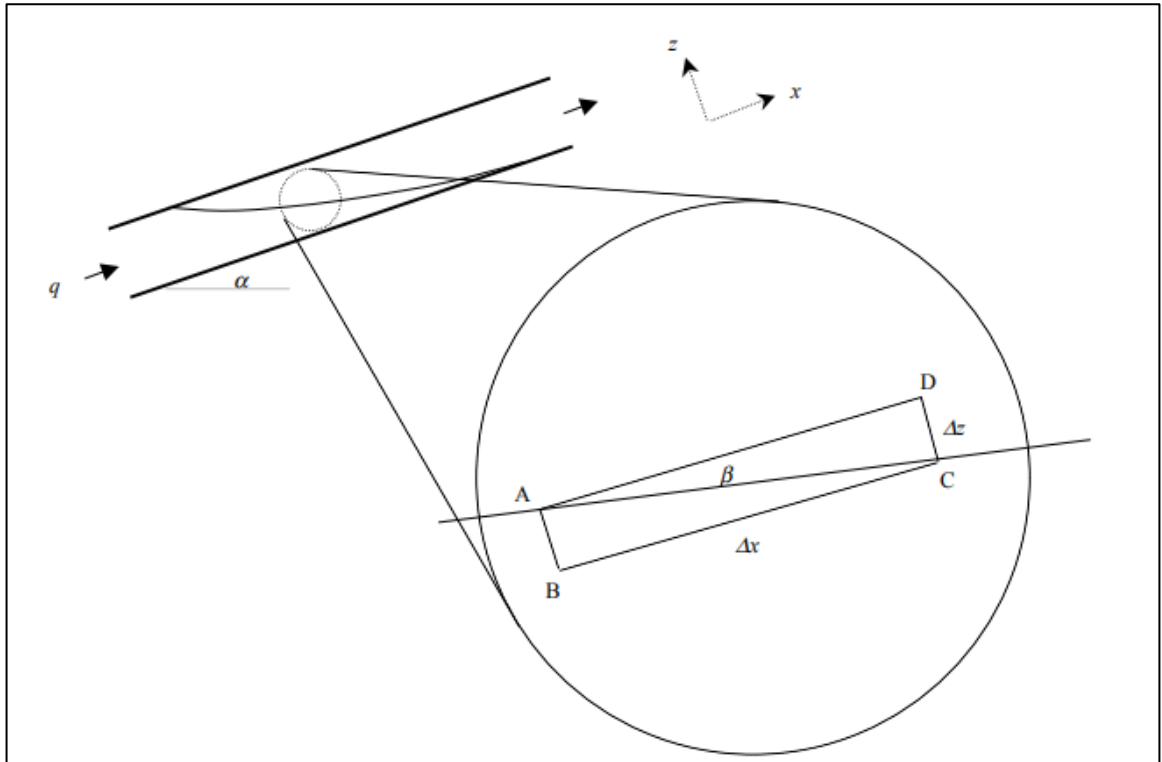


Рис. 1.6. Увеличенный элемент границы раздела фаз с изображением вспомогательных построений для анализа баланса давлений

На рисунке 1.6 граница раздела «нефть-вода» представлена прямой линией, образующей угол β с направлением фильтрации. Сам образец имеет наклон под углом α к горизонту. Запишем уравнения для давлений в обозначенных точках на рисунке 1.6.

$$\begin{cases} P_B = P_A + (AB)\rho_w g \cos(\alpha) = P_A + \Delta z \rho_w g \cos(\alpha) \\ P_C = P_D + (CD)\rho_o g \cos(\alpha) = P_D + \Delta z \rho_o g \cos(\alpha) \end{cases} \quad (1.5)$$

Полагая, что перед границей раздела течет только вода, а за границей – только нефть, можно записать уравнение Дарси для потока q в виде (1.6):

$$\begin{cases} q = -\frac{kk_{ro}A}{\mu_o} \left(\frac{dP}{dx} + \rho_o g \cos(\alpha) \right) \\ q = -\frac{kk_{rw}A}{\mu_w} \left(\frac{dP}{dx} + \rho_w g \cos(\alpha) \right) \end{cases} \quad (1.6)$$

где k – абсолютная проницаемость породы, m^2 ,

k_{ro} и k_{rw} – относительные фазовые проницаемости по нефти и воде,

A – площадь сечения, перпендикулярно которому происходит движение потока, m^2 ,

μ_o и μ_w – динамические вязкости нефти и воды, Па с,

ρ_o и ρ_w – плотности нефти и воды, кг/м³.

Систему (1.6) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} q = -\frac{kk_{ro}A}{\mu_o} \left(\frac{P_D - P_A}{\Delta x} + \rho_o g \cos(\alpha) \right) \\ q = -\frac{kk_{rw}A}{\mu_w} \left(\frac{P_C - P_B}{\Delta x} + \rho_w g \cos(\alpha) \right) \end{cases} \quad (1.7)$$

Учитывая, что $tg\beta = \Delta z/\Delta x$, для него можно получить выражение:

$$\begin{cases} tg\beta = \frac{1 - M_e}{M_e N_{ge} \cos(\alpha)} + \tan(\alpha) \\ N_{ge} = \frac{k_{ro} A k (\rho_w - \rho_o) g}{\mu_o q_{inj}} \\ M_e = \frac{k_{rw}}{\mu_w} / \frac{k_{ro}}{\mu_o} \end{cases} \quad (1.8)$$

Процесс вытеснения будет стабильным, если выполняется условие (1.9):

$$\beta > 0 \quad (1.9)$$

Применяя этот критерий к приведенному выше уравнению (1.8), получим условие для устойчивого фронта вытеснения:

$$\frac{1 - M_e}{M_e N_{ge} \cos(\alpha)} + \tan(\alpha) > 0 \quad (1.10)$$

Из полученного выражения вытекают два случая:

1. Если $M_e < 1$, требование устойчивости всегда выполняется.
2. Если $M_e > 1$, устойчивость условная, то есть вытеснение будет стабильным только в случае когда выполняется (1.11):

$$\frac{1 - M_e}{M_e N_{ge} \cos(\alpha)} > \tan(\alpha) \quad (1.11)$$

Отсюда можно получить выражение для максимальной скорости закачки, ниже которой водонефтяной фронт будет устойчивым:

$$u_{inj} < \frac{k \left(\frac{k_{rw}}{\mu_w} \right) \Delta \rho_{wo} g \sin(\alpha)}{M_e - 1} \quad (1.12)$$

Интересный результат был получен в работе [5]. На своей модели стеклянных шариков при отношении вязкости нефти к вязкости воды равном 10, авторы этой работы наблюдали явление рассеивания языков обводненности по мере насыщения водой обводненных участков.

Рассеивание языков можно объяснить действием капиллярных сил в преимущественно гидрофильной породе, которые замедляют их рост. Однако если рассматриваемая порода является, наоборот, гидрофобной, то рост языков обводненности остановить невозможно.

Таким образом, можно сделать вывод, что основной причиной образования неустойчивого вытеснения является высокое отношение вязкости нефти к вязкости воды. Однако даже если это выполняется, возможны ситуации, когда гравитационные и капиллярные силы могут рассеивать образовавшиеся неустойчивости. Такой же вывод на основе экспериментальных данных был сделан в работе [1]. Рассмотренные в данном разделе модели в полной мере не описывают это явление, в их основе лежит идеализированная модель поршневого вытеснения, которая не наблюдается в реальности.

В настоящей работе будет предложен метод оценки устойчивости фронта вытеснения на основе теории устойчивости границ раздела фаз по Тейлору. При этом будут рассмотрена более сложная модель вытеснения – двухфазная модель, описанная Баклеем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненной работы были получены критерии устойчивости процессов вытеснения. Критерии были получены на основе теории фильтрации флюида, при этом были рассмотрены модели поршневого и двухфазного вытеснения. В ходе работы была создана гидродинамическая модель вытеснения нефти водой в программном комплексе TNavigator. Для рассматриваемых процессов были выполнены расчеты на основе модельных данных. При этом полученные результаты согласуются с практикой разработки месторождений Западной Сибири путем заводнения.

Использованную гидродинамическую модель в дальнейшей можно усовершенствовать, добавив газовую шапку, заводнение полимерным составом.