**Влияние осаждения асфальтенов на течение жидкости в песчанике**

**Mohamed Mehana, Jocin Abraham, Mashhad Fahes**

Ключевые слова: асфальтены, заводнение, смачиваемость, восстановление, относительная проницаемость

Аннотация.

Осаждение асфальтенов в нефтяных резервуарах является спорным вопросом, затрагивающим и скважины, и производительный пласт. Хотя это явление ранее изучалось в нескольких лабораторных экспериментах, аспекты однородности асфальтенового месторождения обычно упускаются из вида. Ранее мы разработали экспериментальный рабочий процесс для создания равномерного отложения асфальтенов внутри образца керна. В этом исследовании влияние этого однородного осадка на течение жидкости количественно определяется с помощью экспериментов по впитыванию, заводнению керна и относительной проницаемости. Кроме того, результаты лабораторных исследований используются при моделировании в полевых масштабах для изучения влияния осаждения на эксплуатационные характеристики месторождения. Результаты показывают сдвиг в состоянии смачиваемости, когда после осаждения наблюдается снижение как скорости впитывания воды, так и ее способности. Кроме того, наблюдается снижение абсолютной проницаемости до 25%. Результаты экспериментов по перепаду давления в керне, проведенных на открытых породах, указывают на изменение характеристик смачивания, при этом открытые породы становятся более смешанно / промежуточно смачиваемыми и меняются в зависимости от изменения начальной насыщенности рассола в породе. Впоследствии на относительную проницаемость влияют, когда наблюдается сдвиг остаточной насыщенности нефти, понижение в кривой нефти и повышение в кривой воды. Повышение масштаба этих новых данных до масштаба месторождения указало на потерю более половины продуктивности скважины и более ранний прорыв в случае внедрения заводнения.

1. Введение

Характеристика и стабильность асфальтенов - это тема, имеющая постоянное значение для нефтяной промышленности. Асфальтены составляют наиболее полярную фракцию сырой нефти с неопределенной молекулярной массой или структурой. Они обычно определяются как класс растворимости, где асфальтены растворимы в легких ароматических соединениях, таких как бензол и толуол, и нерастворимы в легких алифатических соединениях, таких как пентан и гептан. Осаждение этих молекул может быть вызвано нарушением состояния равновесия, либо путем изменения физических условий, либо состава.

Несколько термодинамических моделей были предложены для изучения стабильности асфальтенов. Некоторые отстаивают коллоидную природу асфальтена, где осаждение вызвано мицелло флокуляцией, а другие поддерживают молекулярную природу асфальтена, где осаждение происходит обычным образом. Например, Леонтаритис и Мансоори предположили, что асфальтеновые молекулы представляют собой взвешенные твердые частицы, пептизированные молекулами смолы, присутствующими в смеси. С другой стороны, Ван и Бакли предложили двухкомпонентную модель растворимости, чтобы предсказать начало флоккуляции асфальтенов.

Нарушение проницаемости, вызванное осаждением асфальтенов, очевидно в нескольких экспериментальных исследованиях. Минсьё (1997) провел эксперименты по заводнению керна на образцах песчаника с использованием различных видов сырой нефти, где наблюдается снижение абсолютной проницаемости для циклогексана на 20–90%. Они проанализировали содержание асфальтенов в нефти как во входном, так и в выходящем потоках, и пришли к выводу, что ухудшение проницаемости действительно связано с осаждением асфальтенов. Хамаду и соавт. (2008) сфокусировались на количественном определении ущерба в абсолютной проницаемости кернов Береа и Рурда-Нусса, где Солтрол вводили как для вытеснения сырой нефти, так и для измерения начальной и конечной проницаемости. Кроме того, они коррелировали степень повреждения с содержанием железа в керне, где наблюдалась отрицательная взаимосвязь с уменьшением возможного повреждения, происходящего в кернах с более высоким содержанием железа. Эта связь была также подтверждена Джафари Бейбаани и др., 2013, которая наблюдала ту же тенденцию, помимо положительной связи между содержанием кальцита и степенью осаждения. Отложение асфальтенов в карбонатных породах очевидно. Корд и др. (2012) использовали образцы как газированной, так и дегазированной нефти для изучения осаждения асфальтенов, где они сообщили об экспоненциальном поведении влияния осаждения на повреждение проницаемости и линейном поведении для закупоривания пор.

Осаждение асфальтена моделировалось как в масштабе скважины, так и в масштабе коллектора. Алмихайдеб (2004) разработал четырехкомпонентную модель одиночной скважины, в которой сообщается как о распределении осажденных молекул асфальтенов, так и о снижении проницаемости и пористости, вызванных закупориванием и осаждением. Ширдель и др (2012) критически рассмотрели современные модели осаждения для асфальтенов. Мохабенье и др. (2017) использовали PC-SAFT EOS для правильного моделирования осаждения асфальтенов. Дальнейшее развитие понимания асфальтенов включает использование машины опорных векторов для разработки модели осаждения асфальтенов, вычисление динамики жидкости для изучения осаждения молекул асфальтенов и молекулярное моделирование для изучения взаимодействия между этими молекулами.

Взаимосвязь между смачиваемостью горных пород и осаждением асфальтенов является предметом многих научных исследований. Аль-Маамари и Бакли (2000) экспериментально изучали связь между устойчивостью асфальтенов и смачивающей природой поверхностей слюд, где характер смачивания нефтью увеличился для большинства испытанных сортов нефти. Уэтани (2014) наблюдал увеличение обводненности после появления асфальтенов, что может быть связано с улучшенным состоянием смачивания нефтью, вызванным осаждением асфальтенов. Мёрзаи и др. (2008) также изучали изменение смачиваемости породы путем определения снижения остаточной воды после сырой закачки, уменьшенной с 26,5% до 10,7%. Однако они не приняли во внимание влияние неоднородного осаждения на поведение потока. Волкотт и др. (1996) проверили и количественно оценили это изменение смачиваемости с помощью испытаний на впитывание Amott, в которых они связали степень изменения смачиваемости с содержанием асфальтенов и смол, а также с периодом старения.

Были также проведены ограниченные исследования влияния осаждения асфальтенов на поведение двухфазного потока и его влияние в масштабе резервуара. Хематфар и др. (2013) выполнили несколько экспериментов на песчаных искусственных кернах с асфальтеном из Канады и наблюдали сдвиг в конечных точках относительной проницаемости, соответствующий адсорбции асфальтенов на поверхности. Аналогичные результаты были также получены Шедидом (2001), который изучал осаждение асфальтенов в карбонатных породах с сырыми нефтями с различным содержанием асфальтенов. Было отмечено, что конечные точки относительной проницаемости дополнительно смещаются в зависимости от содержания асфальтенов, причем сырье, имеющее более высокое содержание асфальтенов, демонстрирует более низкую неприводимую водонасыщенность. Насри и Дабир (2009) увеличили эффект от изменений относительной проницаемости до полевых масштабов, где они наблюдали снижение как совокупной добычи нефти, так и забойного давления, и что степень этого снижения зависела от содержания асфальтенов в сырой нефти.

В большинстве цитируемых экспериментальных работ признается неравномерность осаждения, когда на входе в керн наблюдается большее падение проницаемости; однако в этой литературе не отмечается необходимость в равномерном осаждении асфальтенов, чтобы можно было собрать значимые данные по относительной проницаемости. Когда керн испытывает градиент изменения проницаемости между входом и выходом из-за неоднородного осаждения асфальтена, данные измеренного потока и давления не могут быть надежно переведены в пригодные для использования данные относительной проницаемости, которые можно использовать при моделировании. В данной работе количественно определяется влияние равномерного осаждения асфальтенов как на характеристики пласта, так и на подвижность жидкости. Однородность асфальтенового месторождения - это то, что отличает нашу работу от предыдущих попыток таких измерений. Остальная часть этой статьи организована следующим образом; в разделе материалов и методологии представлены как породы, так и жидкости, а также экспериментальная процедура и детали моделирования. В разделе «Результаты и обсуждение» анализируется влияние осаждения на впитывание и падение давления. После этого исследуется ухудшение проницаемости, связанное с осаждением, и впоследствии результаты применяются в полевых исследованиях. Наконец, основные выводы и заключительные замечания обобщены в разделе «Выводы».

2. Материалы и методы

2.1. Породы и жидкости

Керны песчаников Berea используются диаметром один дюйм и длиной от одного до шести дюймов. Реализован воздушный отбор, так как породы подвержены набуханию в глине. Отобранные керны полируются до получения плоской поверхности, а затем измеряются их размеры. Пористость кернов измеряется с помощью порозиметра по закону Бойля с расширением гелия. Как только измерена пористость, оценивается абсолютная проницаемость у кернов с использованием газопроницаемого прибора с азотом под давлением 1500 фунтов на квадратный дюйм. Свойства и размеры породы представлены в Таблице 1.

Сырая нефть, используемая в этих экспериментах, добывается из устья скважины в Техасе. Содержание асфальтена измеряется с использованием модифицированной формы стандарта ASTM IP143 для определения асфальтенов в сырой нефти. Два грамма масла смешивают с 80 г гептана и нагревают для ускорения агрегации асфальтенов. Затем образец пропускают через фильтровальную бумагу в вакууме. Отложение растворяют в толуоле, а затем выпаривают для измерения количества асфальтена в образце. Рассол с 3 мас.% NaCl используется для подавления набухания глины в пресной воде. Кроме того, в качестве вытесняющей жидкости используется гептан, поскольку он не является растворителем для асфальтенов. Толуол используется в основном для очистки установки, во время теста на фильтрацию содержания асфальтенов, а также для удаления отложений асфальтенов. Гелий и азот используются для измерения пористости и проницаемости соответственно. Свойства жидкости приведены в таблице 2.

2.2. Методика проведения

Ранее мы исследовали однородность асфальтенового осадка, где осадок, образованный посредством насыщения вакуумом кернов, демонстрирует более равномерное распределение, чем асфальтеновый осадок за счет введения нефти в керны. В этой работе мы использовали протокол, установленный в этой публикации, для изучения влияния асфальтеновых отложений на поток жидкости с использованием экспериментов по впитыванию и затоплению керна. Этот шаг был определен как важный, чтобы можно было собирать и анализировать значимые данные макроскопического потока. Эксперименты по впитыванию проводятся на кернах с использованием двух циклов пропитки. Нефтенасыщенные ядра сушат в течение дня после промывки гептаном. Испытания на впитывание включают чередование циклов воды и гептана в насыщенных воздухом кернах, разделенных 1-дневной сушкой. Изменение веса погруженных кернов используется для контроля за ходом впитывания. На другом наборе кернов падение давления регистрируется при затоплении рассолом и гептаном.

Относительная проницаемость оценивается для оценки влияния асфальтеновых отложений на подвижность сточных вод. Шести-дюймовые керны используются для этих экспериментов. Рассол и гептан вводят в различной последовательности (общая скорость потока составляет менее 2 куб.см/мин) для получения конечных точек кривых относительной проницаемости. Корреляции пород используются для создания графиков относительной проницаемости с учетом измеренных данных конечной точки.

2.3. Детали моделирования

Лабораторные результаты применяются в масштабе месторождения с использованием модели тяжелой нефти; в такой модели рассматриваются три фазы (нефть, газ и вода), где изменения состава незначительны. Водохранилище простирается на 2500 футов x 2500 футов, и свойства перечислены в таблице 3. Воздействие осаждения асфальтенов учитывается путем принятия кривых относительной проницаемости поврежденного керна наряду с уменьшением абсолютной проницаемости на 10%. Модель пласта включает в себя одну нагнетательную скважину, скорость добычи которой ограничена 1000 баррелей в день, и одну добывающую скважину, у которой забойное давление ограничено 2000 фунтов на квадратный дюйм, размещенные по углам. Нагнетательная скважина ограничена скоростью. Наша модель является многослойной, где вода закачивается снизу, а нефть добывается сверху. Мы разработали наш сценарий моделирования как заводнение, где мы могли бы количественно оценить изменения в характеристиках многофазного потока и его влияние на производительность. Кроме того, мы различали ущерб от абсолютной проницаемости и ущерб от относительной проницаемости. Это проявляется в моделировании сценария, в котором абсолютная проницаемость является единственным измененным параметром, и в другом случае, когда относительная проницаемость является единственным измененным сценарием, после чего производительность этих сценариев сравнивается с общей производительностью, в которой учитываются как абсолютная, так и относительная проницаемость.

3. Результаты и обсуждения

В этом разделе представлено влияние осаждения на самопроизвольное впитывание, падение давления во время заводнения и относительную проницаемость. После этого результаты используются в полевом испытании.

3.1. Результаты впитывания

В качестве динамической меры состояния смачиваемости породы эксперименты по впитыванию проводят на сухих кернах, которые были пропитаны в вакууме сырой нефтью, выдержаны и залиты гептаном, а затем высушены. Результаты представлены на рис. 1. Хотя начальная скорость впитывания контролируется капиллярным всасыванием, емкость впитывания указывает на доступный объем пор. Ясно, в поведении впитывания гептана наблюдаются две разные скорости впитывания в начале и в конце для данного образца породы. При явных изменениях начальной скорости поздняя скорость относительно одинакова для всех рассмотренных случаев гептана. С другой стороны, поведение, связанное с впитыванием воды, испытывает относительно более медленную начальную скорость с поздней скоростью, близкой к нулю. Такое поведение можно объяснить меньшей плотностью и вязкостью гептана по сравнению с водой, что приводит как к более быстрому впитыванию гептана, так и к большему доступному объему пор, так как захваченный газ может легко вызвать противоток.

Как уменьшение начальной скорости впитывания, так и пропускной способности в случае воды по сравнению с контрольным образцом отражает ущерб, вызванный осаждением асфальтена, в его влиянии на проницаемость и смачиваемость. Хотя снижение степени пропитки указывает на изменение характера смачивания породы водой в сторону уменьшения смачивания водой, снижение пропускной способности впитывания указывает на вызванное повреждение проводимости. Кроме того, снижение впитывающей способности гептана во втором цикле по сравнению с контролем указывает на повреждение пропускной способности породы. Немонотонное поведение водного впитывания в контрольной серии, представленной на рис. 2, было описано в нашей ранней работе по набуханию глины. Интересно, что оба теста на водопоглощение, выполненные для горных пород, которые были подвержены воздействию нефти, не показывают такой особенности, хотя в тестах использовалась пресная вода. Это свидетельствует о том, что частицы глины имели меньший доступ к впитанной воде. Воздействие гептана еще больше уменьшило смачивание водой, как показано на рис. 2, в то время как воздействие воды не влияло на впитывание гептана, как показано на рис. 2.

3.2. Падение давления

Уменьшение падения давления во время экспериментов по закачке рассола наблюдается, когда керн подвергается воздействию сырой нефти по сравнению с эталонным случаем, что подразумевает изменение смачивающей природы породы. Этот сдвиг увеличивается, когда в систему вводится больше осаждения путем вакуумного насыщения керна или вакуумного насыщения с последующим пробкой и совместной инъекцией гептана / сырой нефти (в обоих случаях были выдержаны). Горб на кривых падения давления обычно наблюдается, когда вводится смачивающая фаза. Чем дальше уменьшается горб, тем больше меняется характер смачивания. Рис. 2 отображает падение давления в активной зоне для впрыска рассола и гептана, а также значение насыщенности рассола в конце последнего цикла впрыска гептана. История насыщения породы также отмечена в легенде к рисунку. Самородная порода содержит почти 30% остаточной воды, в то время как для пород, подверженных воздействию сырой нефти, наблюдается снижение до 20% остаточной воды. Горная порода, испытывающая наименьшее сопротивление впрыску гептана, является той, которая была подвергнута воздействию сырой нефти с использованием вакуумного насыщения. Это снижение давления объясняется снижением капиллярного давления, а не увеличением подвижности масла. Этот набор данных подтверждает результаты испытаний на впитывание, отражающие пониженное состояние смачивания водой. Породы, подвергаемые воздействию воды до сырой насыщенности, показывают меньшее изменение их смачивающей природы, что видно в случае GB-J9-2.

3.3. Ухудшение проницаемости

Влияние осаждения асфальтенов на проводимость породы сообщается путем количественной оценки как абсолютной потери проницаемости, так и сдвига в кривых относительной проницаемости. Сообщается о более значительном повреждении образцов, в которых осаждение асфальтенов индуцируется инъекцией, по сравнению с образцами под вакуумом, как показано на рис. 3. Сравнение этого результата с распределением TOC в кернах с вакуумной изоляцией показывает, что осаждение асфальтена в кернах, насыщенных вакуумом, более распределено в теле пор по сравнению с инжектированными ядрами, где в горловине пор сконцентрировано больше асфальтена, как показано в результатах обратной инъекции Джеймса и др. (2018).

Кривые относительной проницаемости для одного из заполненных вакуумом кернов сравнивают с собственными кривыми на рис. 4. Сдвиг в конечных точках кривой явно указывает на изменение поведения притока. Хотя наблюдается значительное увеличение критической нефтенасыщенности, критическая водонасыщенность не изменяется. Кроме того, кривая воды увеличивается, а кривая нефти подавляется. Для измененных кривых наблюдалось уменьшение окна насыщения, которое позволяет обеим фазам быть подвижными. Все эти показатели подтверждают вывод о том, что распределенное асфальтеновое месторождение ухудшает относительную проницаемость.

3.4. Результаты симуляции

Карты нефтенасыщенности как для естественной, так и для измененной моделей в конце времени моделирования представлены на рис. 5. Согласно результатам моделирования, более половины продуктивности скважины теряется из-за осаждения асфальтенов, как показано на рис. 6. Кроме того, ранний прорыв наблюдается для измененного случая. Однако это может быть интуитивно предсказано с учетом остаточной нефтенасыщенности и повышенной подвижности воды, используемых на кривых относительной проницаемости. Влияние снижения абсолютной проницаемости на продуктивность скважины незначительно по сравнению с относительной проницаемостью. Сопутствующее повышение давления впрыска при осаждении асфальтена, сообщается на рис. 7, подчеркивает пагубное воздействие осаждения асфальтенов на подтопление. Стоит отметить, что мы учитывали относительную проницаемость ущерба для всего коллектора, а не только вблизи ствола скважины. Вспоминая наши экспериментальные наблюдения, асфальтены оседают по всему керну, просто вводя сырье в породу. Это означает, что поток нефти в пористой среде сам по себе приведет к отложению. Здесь мы пытаемся улучшить это наблюдение, приняв поврежденную относительную проницаемость для всего резервуара.

4. Выводы

В этом исследовании изучается осаждение асфальтенов в образцах породы Grey Berea и его влияние на характеристики породы. Ниже приведены наши основные выводы:

* Ухудшение проницаемости составляет до 25% для кернов, где осаждение вводится путем непрерывного впрыска, и до 15% для кернов, где осаждение вводится с помощью вакуумного насыщения керна. Учитывая, что вакуумное насыщение приводит к равномерному осаждению, должны быть собраны значимые данные относительной проницаемости с использованием этих образцов, а не с использованием кернов, где достигается неравномерное осаждение.
* Изменение смачивающих свойств очевидно: керны становятся более нейтральными или смачиваются нефтью на основании испытаний на впитывание и впрыск при воздействии сырой нефти и осажденных асфальтенов. Это в значительной степени зависело от начальной насыщенности рассола в породе, где те породы, которые подверглись воздействию рассола, демонстрируют состояние смешанного увлажнения. Получение данных об относительной проницаемости от кернов, которые не имеют начальной водонасыщенности, может вводить в заблуждение относительно степени достигнутого изменения смачиваемости.
* Уменьшение набухания глины наблюдается в породах, подверженных воздействию сырой нефти
* Конечные точки относительной проницаемости определяются экспериментально, когда наблюдается более высокая остаточная нефтенасыщенность для открытых кернов. Одним из важных моментов, которые следует отметить в этом случае, является уменьшение ширины окна насыщения, где возможна подвижность как воды, так и нефти.
* Включение повреждения пласта в симуляторе пласта предполагает снижение продуктивности более половины потенциала скважины. Кроме того, ожидается более раннее время прорыва и более высокое давление нагнетания из-за осаждения асфальтенов в резервуаре. Наше разъединение влияния снижения абсолютной проницаемости и эффектов относительной проницаемости показывает, что эффект изменений в относительной проницаемости гораздо более выражен, чем изменения абсолютной проницаемости.