

РАЗВИТИЕ ИНДИКАТОРНОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЙ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УНИВЕРСИТЕТЕ «ДУБНА»

М.С. Хозяинов¹, Д.А. Чернокожев¹, К.И. Кузнецова²,
М.В. Завьялова¹

¹Государственный университет «Дубна»

²Объединенный институт ядерных исследований

E-mail: mkhoz@mail.ru

Кратко изложены основы индикаторного метода исследований нефтяных месторождений. Приведены методика определения расхода объема занятого нагнетаемой водой по результатам разовой закачки меченой жидкости и методика оценки заводненного объема путем непрерывной закачки меченого вещества. Описана возможность прогнозирования коэффициента извлечения нефти неоднородного пласта по результатам индикаторных исследований.

Ключевые слова: индикаторные исследования, заводнение нефтяных месторождений, высокопроницаемые пропластки, коэффициент извлечения нефти.

Индикаторный метод предназначен для прослеживания фильтрации закачиваемой воды на нефтяных месторождениях. Индикаторный метод – единственный метод прямого контроля фильтрации потоков флюида в межскважинном пространстве. Остальные методы оценивают фильтрацию в межскважинном пространстве по информации в отдельных точках, исследуя режимы работы скважин: определяют давление, вязкость флюида, дебиты воды и нефти. Индикаторные исследования основаны на добавлении индикатора (трассера, метящего вещества) в нагнетаемую воду и определении выхода этого индикатора вместе с водой из добывающих скважин. Раствор закачивают в нагнетательную скважину. Таким образом, мы знаем начальный объем закачиваемой меченой жидкости (Q_0 , м³), его концентрацию (C_0 , кг/м³) и массу (M_0 , кг). Пробы объемом 0,5-1 л для определения концентрации индикатора (C_i , кг/м³) отбираются на поверхности с устья добывающей скважины. В отобранной пробе отделяют воду от нефти и в воде определяют концентрацию индикатора. Так как в индикаторных исследованиях используется масса отобранного индикатора (M_i), то измеренная концентрация умножается на суточный дебит воды

скважины (Q_i) и получают массу индикатора, поступившую в скважину за сутки $M_i = C_i \cdot Q_i$. В рамках горизонтально слоистой модели нефтяного пласта предполагается, что это количество индикатора поступило по одному изолированному пропластку.

Разберем некоторые задачи контроля разработки нефтяных месторождений, которые решаются индикаторным методом. Основным методом разработки нефтяных месторождений является заводнение, т.е. закачка в нефтяной пласт воды для поддержаний пластового давления и ускорения добычи нефти. Неоднородность нефтяного пласта по проницаемости, прежде всего наличие высокопроницаемых пропластков (ВП), приводит к неравномерной фильтрации закачиваемой воды по пласту. Закачиваемая вода по ВП движется с очень высокой скоростью: до 100 метров в сутки по поровым и до 20 км/сутки по трещиноватым коллекторам. Это приводит к неэффективной «перекачке» воды по ВП без вытеснения нефти. Индикаторный метод позволяет оценить количество воды, фильтрующейся по ВП, распределение ВП по пласту по направлениям к добывающим скважинам, объем ВП. Индикаторный метод позволяет также оценивать весь объем, занятый закачиваемой водой; текущую водонасыщенность нефтяного пласта; влияние наличия ВП на прогнозируемый коэффициент извлечения нефти.

Расчет объема занятого нагнетаемой водой по результатам разовой закачки меченой жидкости (для одной нагнетательной и одной добывающей скважины) проводится при следующих предположениях. Закачиваемая вода в нагнетательную скважину поступает в отдельные пропластки пропорционально их гидропроводности $\frac{k_i \cdot h_i}{\sum k_i \cdot h_i}$, где i - номер прослоя. Меченая вода поступает в пласт точно по такому же закону. Поэтому если закачивается количество меченого вещества M_0 , то оно по пропласткам распределится так же пропорционально гидропроводности. При этом концентрация меченого вещества, поступившего в каждый пропласток будет одинаковой C_0 . При движении меченой жидкости по пласту предполагается, что каждый пропласток изолирован от других и меченная вода с немеченой водой не смешивается. То есть на всем пути фильтрации от нагнетательной к добывающей скважине концентрация меченой жидкости остается равной C_0 . Меченая вода поступает

в добывающую скважину и смешивается с немеченой водой из других пропластков. При этом значение количества поступившего индикатора в добывающую скважину из i -того пропластка будет таким же, которое поступило в этот же пропласток из нагнетательной скважины. Обозначим это количество как M_i . Объем порции меченой жидкости, которая поступила в i -тый пропласток из нагнетательной скважины будет равен объему меченой жидкости (Q_i), который поступил из i -того пропластка в добывающую скважину. При проведении измерения в пробе с устья добывающей скважины определяется концентрация индикатора в пробе C_i , по которой может быть рассчитано количество поступившего индикатора по i -тому пропластку $M_i = C_i \cdot Q_{\text{воды}}$, где $Q_{\text{воды}}$ – дебит добывающий скважины. Полагая, что все пропластки изолированы друг от друга, оцениваем объем i -того пропластка как произведение Q_i , то есть объема меченой воды, который двигался от нагнетательной к добывающей скважине, на длительность (на время t) его движения от нагнетательной к добывающей скважине в сутках. Так как и меченая и немеченая вода заходила в пропластки пласта пропорционально гидропроводностям можем записать $\frac{Q_i}{Q_{\text{зак}}} = \frac{M_i}{M_0}$, где $Q_{\text{зак}}$ – приемистость нагнетательной скважины в день закачки индикатора, м³/сут. Отсюда $Q_i = \frac{M_i}{M_0} \cdot Q_{\text{зак}}$. Соответственно поровый объем i -того прослоя будет равен $Q_i \cdot t$, а объем всех прослоев будет равен сумме $\sum Q_i \cdot t$. Соответственно можно также оценить объем всех пропластков, по которым вода фильтруется к j -й добывающей скважине: $Q_j = \sum_i^N Q_i$, а также объем всего участка, на котором размещены исследуемые добывающие скважины: $\sum_j^F \sum_i^N Q_{ij}$, где F – число добывающих скважин на участке. Можно также подсчитать вклад в объем заводнения отдельной нагнетательной скважины: $Q_{ji} = \sum_i^F Q_j$.

Пример результатов оценки влияния ВП на эффективность заводнения приведен на рис. 1.

Процентное соотношение производительности каналов НПС
(реагирующее окружение нагнетательной скважины 201)

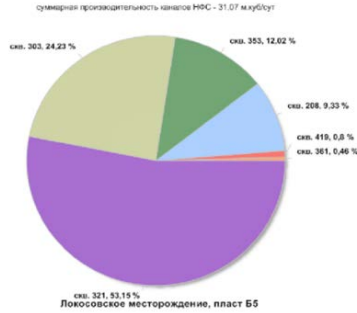


Рис. 1. Оценка влияния ВП на эффективность заводнения окружения нагнетательной скважины 201

Описанный выше метод оценки заводненного объема путем разовой закачки хорошо работает при оценке вклада в заводнение ВП. Для регулярного мониторинга разработки нефтяного месторождения была разработана методика оценки заводненного объема путем непрерывной закачки меченого вещества. Методика была опробована путем моделирования на симуляторе Eclipse. Полученные результаты приведены ниже. Рассмотрим простой случай: одна нагнетательная и одна добывающая скважина. Проводится постоянная закачка меченой воды в нагнетательную скважину с приемистостью V_{pw} , м³/сут., с постоянной концентрацией C_{pw} , кг/м³, т.е. ежедневно закачивается M_0 , кг. Следовательно, в рамках горизонтально-слоистой модели с изолированными пропластками в каждый момент времени в i -й пропласток нагнетательной скважины будет поступать следующее количество меченой воды (M_i , кг): $M_i = M_0 \cdot \frac{K_i H_i}{K_0 H_0}$, где K_i и H_i – проницаемость и мощность i -го пропластка; K_0 и H_0 – проницаемость и мощность пласта в целом. Так как ведется постоянная закачка индикатора, то количество меченого вещества, поступающего в пласт в целом и в отдельный пропласток, можно рассчитать, умножив M_0 и M_i на количество суток с момента закачки. Оценка заводненного объема проводится, исходя из следующих предпосылок. Индикатор закачивается постоянно, поэтому меченая вода постепенно замещает немеченую воду. После начала постоянной закачки индикатора через некоторое время, которое зависит от масштаба месторождения и его «промытости» к моменту начала исследований, вся

вода в пласте будет замещена на меченую. Проведенные исследования на Ромашкинском месторождении показали, что это время может составлять 2–3 года. Далее меченая вода будет замещать немеченую. Поэтому считаем, что весь объем, охваченный заводнением, равен объему закачанной меченой воды, за вычетом меченой воды, добытой из добывающих скважин. Исходя из этих предположений, в рамках горизонтально-слоистой модели пласта с изолированными пропластками была выведена формула для расчета объема пласта, занятого нагнетаемой водой от отдельной нагнетательной скважины:

$$V_w = \frac{V_{pw} \cdot C_{pw} - \sum t \sum_i C_{ew}^i \cdot E_{ew}^i \cdot \Delta t}{C_{pw}},$$

где V_w – объем пласта, занятый нагнетаемой водой, м³; V_{pw} – приемистость нагнетательной скважины, м³/сут.; C_{pw} – концентрация закачиваемого индикатора, кг/м³; E_{ew}^i – дебит добытой воды из i -й добывающей скважины, м³/сут.; C_{ew}^i – концентрация добытого индикатора в i -й добывающей скважине, кг/м³; Δt – интервал времени, сут. Если работают несколько нагнетательных скважин, то в каждую закачивают свой, отличный от других индикатор. Для каждой нагнетательной скважины по данной формуле рассчитывают объем, заводнение которого определяет эта скважина. Далее суммируют полученные объемы и получают общий заводненный объем участка. Такая методика позволяет получить как объем, охваченный заводнением по всему участку в целом, так и вклад в заводнение каждой нагнетательной скважины отдельно. Долю воды от общей закачки в j -ю нагнетательную скважину, которая поступает в i -ю добывающую скважину (W_{ij}), можно определить по отношению массы меченой воды, поступившей в эту i -ю добывающую скважину (M_i), к общей массе меченой воды, закачанной в j -ю нагнетательную скважину (M_j). Определяя в i -й добывающей скважине концентрации разных индикаторов, закачиваемых в окружающие нагнетательные скважины, можно определить массу каждого извлеченного индикатора (M_{ij}). Таким образом можно оценить вклад каждой окружающей нагнетательной скважины в обводнение этой добывающей скважины (G_{ij}):

$$G_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sum_j M_{ij}}.$$

Это значение также можно использовать для оценки заводненного объема пласта в окрестности i -й добывающей скважины от закачки в i -ю добывающую скважину. Разделив значение полученного объема, занятого нагнетаемой водой, на величину порового объема пласта (V_p), полученного из геологической модели, получим значение коэффициента охвата заводнением по объему ($K_{\text{охв}}$): $K_{\text{охв}} = \frac{V_w}{V_p}$.

Прогнозирование коэффициента извлечения нефти. Естественно было предположить, что наличие ВП должно сказываться на величине коэффициента извлечения нефти (КИН). Для изучения этого вопроса было проведено моделирование на нефтяном симуляторе. Моделировалась разовая закачка меченой жидкости с отбором проб в течение 120 суток. Была выбрана модель однородного пласта со средней проницаемостью 500 мДарси, текущая водонасыщенность 0.3, связанная вода 0.1. В результате через 7000 шагов был достигнут предельный КИН, равный 0.43. Затем в пласт был добавлен высокопроницаемый пропласток, объем и проницаемость которого изменялись в следующих пределах: объем высокопроницаемого пропластка составил от 0.5 до 15% от общего объема, а значения проницаемости изменялись от 1000 до 15000 мД. Проведенное моделирование позволило установить, что при изменении значений проницаемости и относительного объема высокопроницаемых пропластков в указанных пределах значения $\text{КИН}_{\text{отн}}$ изменяются в пределах 100-93% от значения КИН для однородного пласта в соответствии с имеющейся гидродинамической модели пласта. Одновременно в процессе проведенного моделирования определялись параметры фильтрации индикаторов (трассеров) по высокопроницаемым пропласткам. Полученные результаты моделирования позволили сопоставить параметры, полученные в результате индикаторных исследований с прогнозными значениями $\text{КИН}_{\text{отн}}$. В качестве параметра индикаторных исследований была выбрана масса индикатора, прошедшая по высокопроницаемым пропласткам (определяется умножением концентрации индикатора в отобранной пробе на обводненность продукции). Полученные расчетные результаты (синие точки на рис. 2) были аппроксимированы кривой (крас-

ная кривая на рис. 2) $y=100-1134/(x-109)^2$, где y – значение КИН_{отн}, x – масса индикатора, прошедшая по высокопроницаемым пропласткам, % от закаченного количества [2].

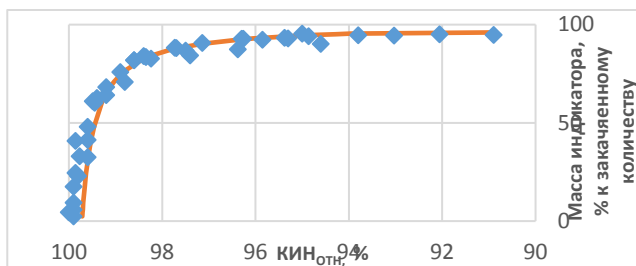


Рис. 2. Расчетные результаты КИН_{отн}, % (синие точки), аппроксимирующая кривая (красная линия), %.

Полученные результаты позволяют рассчитать значения КИН, учитывающие неоднородность нефтяного пласта. Конкретные коэффициенты подходят для месторождения с конкретной функцией Баклея – Леверетта.

Заключение. В статье приведены некоторые результаты, полученные сотрудниками кафедры общей и прикладной геофизики, в области развития индикаторного метода. Всего опубликовано 30 работ, включая две монографии, три патента, три свидетельства о регистрации программы для ЭВМ [1-3]. Защищена одна кандидатская диссертация.

Список литературы

1. Завьялова М.В., Кузнецова К.И., Хозяинов М.С., Чернокожев Д.А. Результаты индикаторных исследований для контроля за разработкой нефтяного месторождения // НТВ «Каротажник» Вып. 3 (323). 2023 г.
2. Хозяинов М.С., Кузнецова К.И., Газимов Р.Р., Чернокожев Д.А. Способ определения текущей водонасыщенности продуктивного пласта // Патент на изобретение 2734358 С1, 15.10.2020. Заявка № 2020114208 от 20.04.2020.
3. Хозяинов М.С., Чернокожев Д.А., Кузнецова К.И. Индикаторный (трассерный) метод исследования фильтрационных процессов в нефтяном пласте // Москва, изд-во КУРС, 2022, 128 с.