УДК 553.982.2/622.2

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИНДИКАТОРНОГО (ТРАССЕРНОГО) МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ОХВАТА НЕФТЯНОГО ПЛАСТА ЗАВОДНЕНИЕМ

Д.А. Чернокожев¹,
К.И. Кузнецова², Р.Р. Газимов³,
А.С. Заседателев¹,
М.С. Хозяинов¹

¹ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ДУБНА»

² ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ (ОИЯИ)

³ ООО «МАНТСГЕО»

В статье приведены результаты моделирования индикаторных (трассерных) исследований процесса заводнения нефтяного пласта. В результате исследований были получены зависимости от времени изменения величины объема, занятого нагнетаемой водой. Приведены формулы, позволяющие рассчитывать значения величины коэффициента охвата участка залежи заводнением в целом и вклад каждой нагнетательной скважины в заводнение. Технология реализуется путем непрерывной закачки индикатора в нагнетательную скважину. Непрерывная закачка разных индикаторов (трассеров) в разные нагнетательные скважины позволяет проводить оперативный мониторинг разработки нефтяного месторождения.

Ключевые слова: нефтяной пласт, заводнение, индикатор (трассер), коэффициент охвата заводнением.

Индикаторный (трассерный) метод исследования нефтяных пластов основан на добавлении в движущийся флюид (как правило, нагнетаемую воду) метки, которая, перемещаясь вместе с флюидом и не меняя его свойств, позволяет оценивать характеристики фильтрации и параметры нефтяного пласта. Индикаторный метод позволяет решать ряд задач. Наиболее распространенным вариантом индикаторных исследований является прослеживание межскважинной фильтрации нагнетаемой воды. Авторы статьи методически выделяют два типа индикаторных исследований: краткосрочные, которые проводятся в течение 90–120 дней, и долгосрочные, проводимые непрерывно в течение всего срока разработки месторождения, или в течение нескольких лет.

Краткосрочные исследования. Такие задачи как установление гидродинамической связи между

MODERN METHODOLOGICAL POSSIBILITIES OF THE TRACER METHOD FOR ASSESSING THE COVERAGE OF AN OIL RESERVOIR BY FLOODING

D.A. Chernokozhev¹,
K.I. Kuznetsova², R.R. Gazimov³,
A.S. Zasedatelev¹, M.S. Khozyainov¹

¹ STATE UNIVERSITY «DUBNA»

² JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH
(JINR)

³ LLC «MANTSGEO»

The article presents the results of modeling tracer studies of the process of flooding of an oil reservoir. As a result of the studies, the dependences on the time of the change in the volume occupied by the injected water were obtained. Formulas are given that allow us to calculate the values of the coefficient of coverage of the reservoir area by flooding as a whole and the contribution of each injection well to flooding. The technology is implemented by continuously pumping the tracer into the injection well. Continuous injection of different tracers into different injection wells allows for operational monitoring of oil field development.

KEY WORDS: oil reservoir, flooding, indicator (tracer), volumetric efficiency.

DOI: 10.52531/1682-1696-2021-21-1-24-28

пластами и скважинами, определение опережающего обводнения по высокопроницаемым прослоям, оценка эффективности проводимых мероприятий по повышению нефтеотдачи пласта и некоторые другие решаются с помощью краткосрочных исследований, которые проводятся в течение 90–120 дней. Такие исследования на современном рынке нефтяной отрасли являются в настоящее время преобладающими по объему. Они описаны в ряде опубликованных статей и поэтому здесь не рассматриваются.

Вторая проблема – совершенствование системы управления эффективностью добычи нефти. Для обеспечения такой системы управления актуальной информацией авторами предлагается использовать результаты долгосрочных индикаторных исследований. Рассмотрим технологию непрерывной оценки текущего охвата заводнением участка залежи и залежи

в целом. Для изучения возможности определения объема пласта, занятого нагнетасмой водой, было проведено моделирование с помощью симулятора. Для первого, самого простого, варианта моделирования была выбрана условная однородная модель с одной нагнетательной и одной добывающей скважиной (рис. 1А).

Расстояние от нагнетательной до добывающей скважины 372 м. Модель однородная по направлениям x и y по проницаемости и составляет 2000 мД. Начальная водонасыщенность ячеек модели равна 0,4. Значение коэффициента пористости для каждой ячейки составляет 0,25. Моделирование проводилось для периода 5000 суток. Общий поровый объем модели составляет 69192 м³. Перепад давления между нагнетательной и добывающей скважинами составляет 150 атм. Расчеты проводились с помощью программного обеспечения для моделирования Eclipse. В нагнетательную скважину постоянно проводилась закачка индикатора с постоянной концентрацией. По результатам моделирования получены общие объемы закачки индикатора, концентрации добываемого индикатора посуточно, дебиты воды в скважинах, приемистость воды в скважинах. Для пары нагнетательной и добывающей скважин была рассчитана масса извлекаемого индикатора. На основании многолетних индикаторных исследований была предложена формула для расчета объема пласта, занятого нагнетасмой водой:

$$V_w = (V_{pw} \cdot C_{pw} - \int_0^t C_{ew} \cdot E_{ew} \cdot dt) / C_{pw} \quad (1)$$

где: V_w – объем пласта, занятый нагнетасмой водой, V_{pw} – приемистость нагнетательной скважины м³, C_{pw} – концентрация, закаченного индикатора, C_{ew} – дебит добытой воды, E_{ew} – концентрация добытого индикатора.

Подчеркнем, что в реальной жизни V_w можно получить только в результате полевых индикаторных исследований.

РИС. 1.

Схемы участков для четырех вариантов моделирования. 1, 2, 3 – нагнетательные скважины, 4, 5, 6, 7 – добывающие скважины

Также был получен объем, занятый водой, по результатам моделирования с помощью программного обеспечения Eclipse.

Полученный результат расчета объема пласта, занятого водой, по индикаторным данным (51695,9 м³) сравнивался с величиной объема пласта, занятого водой, по результатам прямого моделирования в Eclipse (51888,4 м³). Расхождение результатов в пределах 0,37%.

Следующей была выбрана модель с одной нагнетательной и одной добывающей скважиной (вариант 2). Размер модели 93/93/2 ячейки, расстояние между скважинами 372 м (рис. 1Б). Модель неоднородная разбита на 2 участка: проницаемость первого участка составляет 2000 мД, а второго участка – 1000 мД. Начальная водонасыщенность 0,4. Пористость каждой ячейки сетки составляет 0,25. В нагнетательную скважину закачивался индикатор с постоянной концентрацией в течение всего периода исследований. Моделирование проводилось для периода 5000 суток.

Полученный результат объема пласта, занятого водой, по результатам индикаторных исследований (51453,93 м³) сравнивался с подсчетом объема пласта, занятого водой, по результатам прямого моделирования в Eclipse (51676,95 м³). Расхождение результатов в пределах 0,43%.

Для дальнейшего моделирования (вариант 3) была выбрана условная гидродинамическая модель нефтяного пласта с одной нагнетательной и двумя добывающими скважинами (рис. 1В). Модель разделена на две одинаковые по объему части по проницаемости в x и y направлениях, которая составляет 2000 мД (1,97 мкм²) первый участок и 1000 мД (0,97 мкм²) – второй. Начальная водонасыщенность ячеек в сетки модели составляет 0,4, а связанная вода 0,11. Пористость данного пласта составила 0,25. Расстояние между каждой парой, нагнетательной и добывающей скважин составляет 415,9 метра. Перепад давления между каждой парой, нагнетательной и добывающей скважинами составляет 15 Мпа. Общий поровый объем модели составляет 69192 м³. Как и ранее, был рассчитан объем, занятый водой, двумя способами. Расхождение результатов в пределах 0,39%.

Как видно из рис. 2, заводнение пласта происходит неравномерно. Так как вода фильтруется в первую очередь по высокопроницаемому пласту, видно, что в первые несколько лет почти весь вклад в заводнение вносит добывающая скважина 4. И только спустя тысячу суток от начала закачки добывающая скважина 5 начинает вносить существенный вклад в заводненный объем.

Далее было проведено моделирование на участке с одной нагнетательной и двумя добывающими скважинами (рис. 1В) при трех разных значениях начальной водонасыщенности (варианты 4, 5, 6). Модель участка разделена на две одинаковые по объему части по про-

РИС. 2.

Доля заводненного объема участка пласта (Q) по каждой добывающей скважине: сплошная линия – скважина 4, пунктирная линия – скважина 5

ницаемости в x и y направлениях, которая составляет 2000 мД (1,97 мкм²) и 1000 мД (0,97 мкм²). Связанная вода 0,11. Пористость данного пласта составила 0,25. Расстояние между каждой парой, нагнетательной и добывающей скважин составляет 415,9 метра. Перепад давления между каждой парой, нагнетательной и добывающей скважинами составляет 15 Мпа. Общий поровый объем модели составляет 69192 м³. Были рассмотрены 3 случая, когда начальная водонасыщенность составляла минимальную водонасыщенность 0,1, среднюю водонасыщенность 0,4 и почти максимальную водонасыщенность 0,7.

По результатам моделирования для каждого варианта модели получены общие объемы закачки индикатора, концентрации добываемого индикатора, дебиты воды в скважинах, приемистость воды в скважинах. Для каждой пары нагнетательной и добывающей скважин была рассчитана масса извлекаемого индикатора. Из полученных данных рассчитан объем пласта, занятый нагнетаемой водой по формуле (1).

Ниже представлены изменения во времени объема пласта, занятого водой, для различных значений начальной водонасыщенности (рис. 3).

Как видно из рисунка 3, на поздней стадии разработки залежи, метод определяет величину заводненного объема, но не показывает динамику. Водонасыщенность пласта приближается к своему максимуму и мало меняется – пласт промыт, нагнетаемая вода фильтруется по уже промытым пропласткам. На ранней и средних стадиях разработки метод улавливает динамику процесса и позволяет оценить вклад в заводнение отдельных нагнетательных скважин, так как меченая вода вытесняет из порового объема нефть и немеченую пластовую воду.

Далее для моделирования была выбрана более сложная модель с 3 нагнетательными и 4 добывающими

А.А. ЧЕРНОКОЖЕВ, К.И. КУЗНЕЦОВА,
Р.Р. ГАЗИМОВ, А.С. ЗАСЕДАТЕЛЕВ,
М.С. ХОЗЯИНОВ
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ИНДИКАТОРНОГО (ТРАССЕРНОГО) МЕТОДА ДЛЯ
ОЦЕНКИ ОХВАТА НЕФТЯНОГО ПЛАСТА ЗАВОДНЕНИЕМ

РИС. 3.

Изменения во времени объема пласта, занятого водой, для различных значений начальной водонасыщенности. Сплошной линией обозначена кривая объема пласта, занятого водой от нагнетательной скважины для водонасыщенности 0,1. Пунктирной линией – для водонасыщенности 0,4. Штрих-пунктирной линией – для водонасыщенности 0,7

ми скважинами (вариант 7). Размер модели – 93/93/2 ячеек по осям x , y и z (рис. 1Г). Модель неоднородная, разделенная на 3 одинаковые по объему части по проницаемости в x и y направлениях, которая составляет 1000 мД, 3000 мД, 2000 мД. Начальная водонасыщенность ячеек в сетки модели составляет 0,4, а связанная вода 0,11. Общий поровый объем модели 69192 м³. В нагнетательные скважины закачивали три различных индикатора, в каждую скважину свой в течение всего периода моделирования. Моделирование проводилось для периода 2000 суток. По результатам моделирования получены общие объемы закачки индикатора, концентрации добываемого индикатора, дебиты воды в скважинах, приемистость воды в скважинах. Для каждой пары нагнетательной и добывающей скважин была рассчитана масса извлекаемого индикатора. Из полученных данных рассчитан объем пласта, занятый нагнетаемой водой, по формуле (1).

Объем, охваченный заводнением, рассчитывался для каждого из 3-х нагнетательных скважин и добывающего окружения (рис. 4А).

Были также построены графики изменения во времени вклада каждой добывающей скважины в величину объема пласта, занятого водой, от закачки в нагнетательную скважину 1 (рис. 4Б), в нагнетательную скважину 2 (рис. 4В) и в нагнетательную скважину 3 (рис. 4Г).

Как видно из рисунков на начальных этапах максимальный вклад в заводненный объем от первой нагнетательной скважины приходится на вторую добывающую скважину, находящуюся на разделе проницаемостей пласта. Но с течением времени вклад в заводненный объем от первой добывающей скважины возрастает. Для второй нагнетательной скважины основное влияние на величину заводненного объема оказывают вторая и третья добывающие скважины.

Д.А. ЧЕРНОКОЖЕВ, К.И. КУЗНЕЦОВА,
Р.Р. ГАЗИМОВ, А.С. ЗАСЕДАТЕЛЕВ,
М.С. ХОЗЯИНОВ
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ИНДИКАТОРНОГО (ТРАССЕРНОГО) МЕТОДА ДЛЯ
ОЦЕНКИ ОХВАТА НЕФТЯНОГО ПЛАСТА ЗАВОДНЕНИЕМ

Рис. 4.

а – Изменение во времени величины объема пласта, занятого водой от разных нагнетательных скважин (Штрих-пунктирной линией обозначен объем пласта от нагнетательной скважины 1, пунктирной линией – от нагнетательной скважины 2, сплошной линией – от нагнетательной скважины 3). б – Доля заводненного объема участка пласта (Q) от закачки в нагнетательную скважину 1 по каждой добывающей скважине (1-ая скв. – точки, 2-ая скважина – сплошная, 3-ья – пунктир, 4-ая – штрих-пунктир). в – Доля заводненного объема участка пласта (Q) от закачки в нагнетательную скважину 2 по каждой добывающей скважине (Сплошная линия – от второй добывающей скважины, пунктирная линия от третьей добывающей скважины). г – Доля заводненного объема участка пласта (Q) от закачки в нагнетательную скважину 3 по каждой добывающей скважине (Сплошная линия – изменение во времени вклада от третьей добывающей скважины, пунктирная линия – изменение во времени вклада от четвертой добывающей скважины)

Для третьей нагнетательной скважины основное влияние на величину заводненного объема оказывают третья и четвертая добывающие скважины.

Полученное значение коэффициента охвата пласта заводнением, рассчитанное по результатам индикаторных исследований (51700,26 м³), сравнивались с подсчетом объема пласта, занятого водой, по результатам прямого моделирования в Eclipse (51887,09 м³). Совпадение результатов в пределах 0,4%.

На основе проведенных исследований было предложено определять коэффициент охвата пласта заводнением за счет закачки в i -ю нагнетательную скважину по формуле:

$$K_i = \frac{P_{зак\ i} \cdot \Pi_i \cdot T_i - \sum_{j=1}^{j=N} P_{доб\ ij} \cdot D_j \cdot T_j}{O \cdot P_{зак\ i} \cdot \Pi_i \cdot T_i} \quad (2)$$

где $P_{зак\ i}$ – концентрация i -го индикатора в воде, ко-

торая закачивается в i -ю нагнетательную скважину, кг/м³ × сутки; Π_i – приемистость (расход вытесняющей жидкости) i -й нагнетательной скважины, м³/сутки; T_i – длительность закачки вытесняющей жидкости, содержащей i -ый индикатор, сутки; $P_{доб\ ij}$ – концентрация i -го индикатора в воде, которая поступает в j -ую добывающую скважину, кг/м³ × сутки; D_j – дебит воды j -ой добывающей скважины, м³/сутки; T_j – длительность отбора воды, содержащей i -ый индикатор из j -ой добывающей скважины, сутки; O – объем порового пространства исследуемого участка залежи, включающего N добывающих скважин и M нагнетательных скважин, м³; K_i – коэффициент охвата пласта заводнением за счет закачки в i -ю нагнетательную скважину, отн. ед.; N_j – число добывающих скважин в окружении j -ой добывающей скважины; M – число нагнетательных скважин, в которые закачивают вытесняющую жидкость, меченую индикаторами. Интегральный охват пласта заводнением участка за счет всех нагнетатель-

ных скважин ($K_{\text{сум}}$) рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^{i=M} K_i \quad (3)$$

Вклад i -й нагнетательной скважины в обводнение каждой j -ой добывающей скважины рассчитывают как отношение количества извлеченного i -го индикатора из j -ой добывающей скважины к сумме добытого i -го индикатора по всем добывающим скважинам:

$$K_{ij} = \frac{P_{\text{доб}ij} \cdot D_j \cdot T_j}{\sum_{j=1}^{j=N} P_{\text{доб}ij} \cdot D_j \cdot T_j} \quad (4)$$

Предлагаемая технология реализуется следующим образом. В нагнетательные скважины постоянно закачивают вытесняющую жидкость, меченую индикаторами, причем для каждой нагнетательной скважины в течение всего периода эксплуатации используют один индикатор, отличный от других. В процессе закачки для каждой нагнетательной скважины определяют расход закачанной вытесняющей жидкости и концентрацию индикатора в ней и осуществляют отбор проб жидкости с устья добывающих скважин. Определяют объем отобранной воды из каждой добывающей скважины и в отобранных пробах определяют концентрации всех закачанных индикаторов. По полученным данным определяют вклад каждой нагнетательной скважины в общий охват пласта заводнением и вклад этой нагнетательной скважины в обводнение каждой добывающей скважины.

Коллектив авторов, в число которых входят и соавторы статьи, разработал методики мониторинга разработки нефтяного месторождения на основе долгосрочных индикаторных исследований. Методики защищены рядом патентов России и Казахстана [2, 3]. Предлагаемые методики основаны на использовании большого числа индикаторов. Это может быть достигнуто с использованием новых индикаторов на основе квантовых точек [1]. Авторы полагают, что уже разработанные и вновь создаваемые методики индикаторных исследований могут существенно расширить информационную основу современной технологии управления добычей нефти на месторождении.

А.А. ЧЕРНОКОЖЕВ, К.И. КУЗНЕЦОВА,
Р.Р. ГАЗИМОВ, А.С. ЗАСЕДАТЕЛЕВ,
М.С. ХОЗЯИНОВ
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ИНДИКАТОРНОГО (ТРАССЕРНОГО) МЕТОДА ДЛЯ
ОЦЕНКИ ОХВАТА НЕФТЯНОГО ПЛАСТА ЗАВОДНЕНИЕМ

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурьянов А., Каташов А., Овчинников К. Диагностика и мониторинг притоков скважин с помощью трассеров на квантовых точках. «Время колтюбинга. Время ГРП», № 2 (060), Июнь 2017. С. 42–51.
2. Севастьянов Е.А., Мухамбеталиев Р.М., Айдарханов Р. Т. и др. Способ индикаторного исследования скважин и межскважинного пространства. Патент РК № 34882, Опубл. 12.02.2021, бюл. № 6.
3. Хозяинов М.С., Кузнецова К.И., Газимов Р.Р., Чернокожев Д.А. Способ определения текущей водонасыщенности продуктивного пласта. Патент РФ № 2734358, Опубл. 15.10.2020, бюл. № 29.

Чернокожев Дмитрий Александрович,
к.т.н., доцент кафедры общей и прикладной геофизики Государственного университета «Дубна»

✉ 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19, тел.: +7 (910) 848-56-43
141980, Moscow region, Dubna, st. Universitetskaya, 19

Кузнецова Ксения Игоревна,
инженер Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,

✉ 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6, 141980, Moscow region, Dubna, st. Joliot-Curie, 6
тел.: +7 (915) 046-85-76

Заседателев Антон Сергеевич,
аспирант кафедры общей и прикладной геофизики Государственного университета «Дубна»,

✉ 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19, тел.: +7 (996) 134-04-90
141980, Moscow region, Dubna, st. Universitetskaya, 19

Газимов Рамиль Раисович,
исполнительный директор ООО «МАНТСГЕО»,

✉ 461040, Оренбургская обл., г. Бузулук, ул. 1 мая, д. 100, к. 13, тел.: +7 (926) 230-22-44
461040, Orenburg region, Buzuluk, st. May 1, 100, office 13

Хозяинов Михаил Самойлович,
д.т.н., профессор кафедры общей и прикладной геофизики Государственного университета «Дубна»

✉ 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19, тел. +7 (910) 479-07-45, e-mail: mkhoz@mail.ru
141980, Moscow region, Dubna, st. Universitetskaya, 19