

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ РАССТАНОВКИ СКВАЖИН ПРИ ЗАВОДНЕНИИ<sup>1</sup>

© 2013 А.Е. Касаткин<sup>2</sup>

Основной целью исследования стала разработка программного средства для количественного и качественного сравнения различных схем расстановки скважин, применяемых при заводнении: оценки предполагалось проводить на основе решения задачи о продвижении ВНК во времени. Результаты анализа могут быть использованы при проектировании заводнения реальных месторождений. В основе программного комплекса лежит модель бесконечного однородного пласта фиксированной толщины, поверхность которого покрывается двоякопериодической решеткой с добывающими и нагнетательными скважинами в ячейках. Для описания процесса совместной фильтрации воды и нефти использовалась модифицированная дзета-функция Вейерштрасса.

**Ключевые слова:** заводнение, двоякопериодическая решетка, водонефтяной контакт, обводнение скважин, коэффициент охвата по площади.

### Введение

Вторичные интенсивные методы добычи нефти в настоящее время сохраняют популярность в нефтяной промышленности: их использование на старых ранее истощенных месторождениях позволяет частично восстановить пластовую энергию и поднять упавшие показатели нефтедобычи, причем порою весьма значительно. Основная идея вторичных методов заключается в закачке в нефтеносный пласт т. н. "вытесняющих агентов" — воды и газа: нагнетаемые с поверхности вещества восстанавливают упавшее пластовое давление, а также вытесняют нефть к добывающим скважинам, повышая уровень нефтеотдачи.

Исторически первым вторичным методом, случайно открытым в середине 1860-х гг. [1], стало заводнение. Операторами одного из месторождений штата Пенсильвания было обнаружено, что поверхностная вода, просочившаяся в пласт сквозь обшивку ранее отключенных, но не законсервированных скважин, частично восстановила упавшее пластовое давление: в результате объемы извлекаемой нефти в соседних, все еще работавших скважинах, возросли, причем в некоторых из них значительно. Замеченный эффект был изучен и впоследствии обрел статус технологии: с 1920-х и 1930-х гг. заводнение начало постепенно распространяться по территории нефтедобывающих штатов (Оклахома, Канзас, Техас и т. д.) [2]. В СССР новая технология впервые была применена в промышленном масштабе на

<sup>1</sup>Работа поддержана грантом РФФИ 13-01-97008-р\_поволжье\_а.

<sup>2</sup>Касаткин Андрей Евгеньевич (darantion\_yar@mail.ru), кафедра безопасности информационных систем Самарского государственного университета, 443011, Российская Федерация, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

территории Туймазинского месторождения в 1948 г. [3]. Считается, что к концу XX – началу XXI в. заводнение обеспечивало 90 % всей нефти, добываемой на территории РФ [3] и около 50 % "черного золота" в США [1; 2].

## **1. Актуальность задачи и особенность предлагаемого подхода**

Высокая популярность технологии и широкое распространение обуславливают актуальность задач по ее оптимизации, в первую очередь на стадии проектирования. Планирование разработки месторождения – достаточно трудоемкий процесс, требующий тщательного анализа характеристик нефтеносных пластов, их геометрии, особенности проницаемости и т. д. Не менее значимым является вопрос об оптимальном подборе параметров для применяемой технологии добычи нефти. Ошибки в планировании, неучет важных характеристик пласта, игнорирование особенностей метода извлечения нефти или его недостаточная изученность могут привести к многомиллионным убыткам. При исследовании заводнения весьма важной является оценка его потенциальной эффективности при различных способах взаимной расстановки разнопрофильных скважин – одного из ключевых аспектов технологии. Задачи, подразумевающие подобный теоретический анализ, остаются актуальными: их решения следует использовать при проектировании системы разработки для реальных месторождений.

Прогнозирование хода заводнения, анализ количественных и качественных характеристик процесса при различных схемах расстановки скважин – цель настоящего исследования.

Соответствующая ей задача заключалась в разработке программного средства для мониторинга водонефтяного контакта (ВНК), расширяющегося со временем: для этих целей предполагалось описать и визуально отобразить трассировку нагнетаемой в пласт воды. Работа программы подразумевает сравнительный анализ схем заводнения, качественный и количественный: в качестве выходных данных выступают как графические изображения ВНК, построенные для любого этапа процесса, вплоть до прорыва воды в добывающие скважины, так и значения числовых критериев, таких как время начала обводнения и коэффициент охвата по площади.

Для выполнения основной задачи требовалось построить модель нефтеносного пласта, математически описать фильтрацию жидкостей в нем, представить в виде уравнений процесс трассировки нагнетаемой воды, вытесняющей нефть, и, наконец, разработать алгоритмы для визуального отображения фронта вытеснения (заводнения) и подсчета числовых параметров.

Настоящая работа принадлежит к достаточно широко распространенному ряду модельных исследований: являясь исключительно теоретическими, эти задачи рассматривают вопрос о продвижении водонефтяного контакта (ВНК), используя при этом т. н. вероятностно-статистическое описание нефтеносного пласта [3]. Кроме того, отличительной особенностью рассматриваемого ряда исследований является допущение об одинаковых физических свойствах воды и нефти – т. н. модель "разноцветных" жидкостей [4]. Задачи, решаемые в подобной постановке, имеют давнюю историю. Одним из первых ими занялся Маскет [5]: приняв равными вязкости фильтрующихся жидкостей, исследователь поставил и аналитически решил задачи о продвижении линейного водяного фронта (моделирующего действие за-

контурной краевой воды), а также о течении воды между нагнетательной и добывающей скважиной в бесконечном однородном плоском резервуаре. В своей работе И.А. Чарный [6] также изучал вопрос о продвижении фильтрующихся частиц в одножидкостной среде: автором были приведены как формулы для определения координат частиц (решением обыкновенного дифференциального уравнения с известной функцией скорости), так и рассмотрены задачи линейного и радиального вытеснения нефти водой в резервуаре с постоянной мощностью, проницаемостью и пористостью. Также следует отметить реализованную исследователем идею о трубках тока, моделирующих проводящие водонефтяные каналы в пористой структуре пласта: указанное представление также использовалось И.А. Чарным в задаче о продвижении частиц в одножидкостной среде. Линейное и радиальное течение однородной жидкости также рассматривалось В.Н. Щелкачевым и Б.Б. Лапуком [7]: исследуя поток при водонапорном режиме, авторы аналитически вывели простые формулы для расчета таких показателей процесса фильтрации, как расход вещества, давление, градиент давления и скорость, а также продемонстрировали общее свойство гидродинамического поля — ортогональность линий тока и кривых постоянного давления (изобар). Наконец, задача о продвижении ВНК при площадном заводнении с допущением равенства динамических вязкостей воды и нефти решалась С. Файем и М. Пратсом [8], а также Р. Коллинзом [9]: в качестве объекта исследования авторы выбрали пятиточечную схему расстановки скважин.

В настоящей работе предлагается решение задачи о продвижении ВНК для равных вязкостей нефти и воды, но с большим разнообразием форм моделируемого резервуара: особенностью исследования является применение двоякопериодических функций, позволяющих анализировать многочисленные схемы заводнения с сохранением простоты представлений скорости и давления, остающихся аналитическими.

## 2. Математическая модель

Построение модели нефтеносного пласта, выделение особенностей геометрии и задание границ – первый этап в создании представления о совместном течении нефти и воды на участке, подверженном заводнению. При этом следует помнить о вероятностно-статистическом описании резервуара, при котором не учитывается реальная физико-геологическая структура, индивидуальная для каждого месторождения. Как известно [3], в нефтяной промышленности используется несколько вторичных методов добычи, разделяемых по разным признакам. В частности, выделяют рядные и площадные схемы заводнения, особенности которых определяют их применение на тех или иных участках разработки. Так, рядные модели обладают большей устойчивостью к отказам в работе скважин и оказывают более равномерное воздействие на месторождение, однако площадные, обладающие меньшей зоной охвата, учитывают больше деталей в строении пласта и позволяют распределить влияние заводнения по его (пласта) участкам наиболее рационально за счет своей "компактности". С развитием практики и теории нефтедобычи актуальными становятся вопросы повышения эффективности тех или иных методов: так, некоторыми авторами [10] предлагаются меры по повышению интенсивности разработки за счет видоизменения схем заводнения, что увеличивает их возможное число. Тем не менее можно выделить общее качество, объединяющее все виды этих моделей: независимо от их сложности и направленности при использовании всякой схемы расстановки скважин последние размещаются на месторождении в

определенном порядке. Этот порядок обеспечивает периодичность во взаимном расположении скважин: при взгляде "сверху" пласт словно покрывается сеткой из ячеек — повторяющихся элементов у схем заводнения (рис. 1).

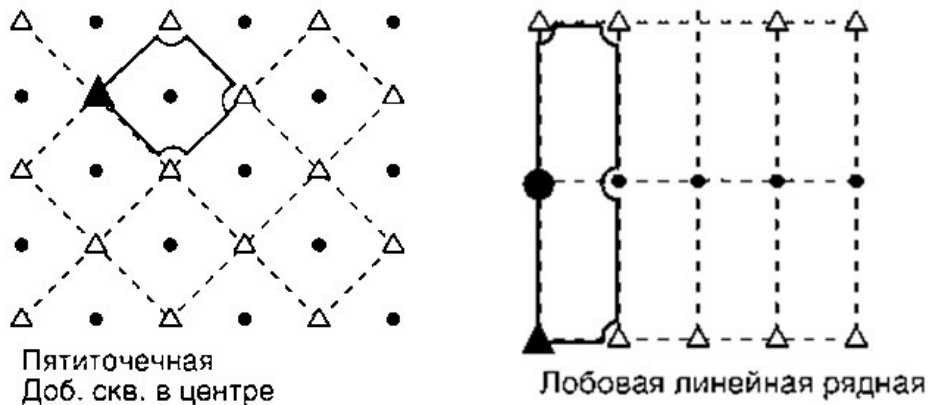


Рис. 1. Пример площадной (слева) и рядной (справа) схем заводнения: добывающие скважины обозначены кружками, нагнетательные — треугольниками; жирные контуры выделяют повторяющиеся элементы во взаимном расположении скважин — эти же элементы можно представить ячейками воображаемой сетки, покрывающей месторождение

Итак, после ознакомления с особенностями рассматриваемого метода нефтедобычи можно перейти к моделированию системы разработки воображаемого месторождения: в рамках настоящей задачи нефтесодержащий пласт представляется однородным, фиксированной толщины, имеющим вид плоскости в комплексных координатах, покрываемой сеткой из добывающих и нагнетательных скважин. Для описания последней (сетки) математический аппарат располагает специальным средством — это т. н. двоякопериодическая решетка [11; 12]. На рис. 2 показан фрагмент указанной структуры с выделенной ячейкой.

Как видно из изображения, решетка  $L$  формируется набором узлов, образуемых векторами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . На рис. 2 представлен т. н. "канонический" случай, при котором  $\omega_1$  совпадает с горизонтальной осью, а  $\omega_2$  описывается следующим образом:  $\omega_2 = \lambda e^{i\theta}$ . Здесь  $\lambda$  представляет длину второго вектора  $\omega_2$ ,  $\theta$  — угол между  $\omega_2$  и осью  $OX$ ,  $\Delta$  соответствует площади ячейки, имеющей вид параллелограмма. Отдельно следует указать вид узлов  $\omega$ , задающих решетку:  $\omega = m\omega_1 + n\omega_2$  ( $m, n \in Z$ ). Благодаря использованию  $L$  и бесконечности границ пласта область исследования может быть сужена до одной ячейки, процессы в которой дублируются в ее соседях. В то же время указанное свойство решетки накладывает определенные ограничения на поведение определяемых на ней функций, а именно — соблюдение двоякой периодичности.

Подобное выражение для скорости фильтрации было описано в работах [11; 12], в которых использовалась двоякопериодическая решетка с одиночной добывающей скважиной в ячейке. Соответствующая ей формула представлена ниже:

$$v(z, \bar{z}) = -\frac{Q}{2\pi h} (\zeta(z) + \alpha\bar{z} - \beta z). \quad (1)$$

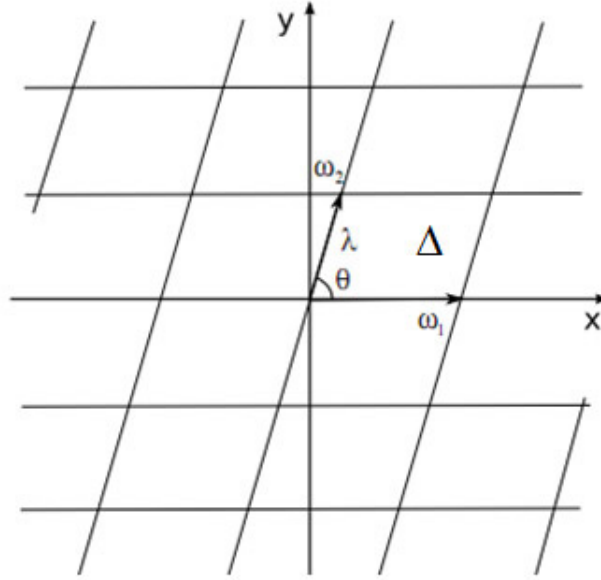


Рис. 2. Фрагмент двоякопериодической решетки  $L$  канонической формы (одна из осей направлена вдоль  $OX$ ); типичная ячейка, образованная векторами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , имеет вид параллелограмма

Здесь  $\zeta(z) = \frac{1}{z} + \sum_{n,m=-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{z-\omega} + \frac{1}{\omega} + \frac{z}{\omega^2} \right)$  – дзета-функция Вейерштрасса [11; 12];  $\beta = \frac{\pi}{\Delta}$  и  $\alpha = \frac{\beta\bar{\omega} - 2\zeta(\omega/2)}{\omega}$  – числовые параметры;  $\Delta$  – площадь ячейки;  $Q$  – мощность добывающей скважины;  $h$  – толщина пласта,  $\omega$  – узел решетки  $L$  ( $\omega = m\omega_1 + n\omega_2$ ) [11; 12]. Важно отметить, что именно величины  $\alpha$  и  $\beta$  обеспечивают двоякопериодичность функции  $v(z, \bar{z})$ . Таким образом, выражение (1) может быть использовано для описания течения жидкости в открытом нефтеносном пласте толщины  $h$ , разрабатываемом системой добывающих скважин одинаковой мощности  $Q$ : последние располагаются в узлах покрывающей месторождение двоякопериодической решетки  $L$ . Линейный характер формулы (1) позволяет легко обобщить ее на случай размещения нескольких скважин в одной ячейке. Кроме того, рассматриваемое выражение для скорости также позволяет учесть направленность работы скважин: добывающие отмечаются знаком "минус" перед соответствующим им слагаемым, нагнетательные – знаком "плюс". Формула (2) демонстрирует итоговый вид функции скорости, принятый в решаемой задаче после всех указанных модификаций выражения (1):

$$v(z, \bar{z}) = - \sum_{u=1}^{n1} \frac{Q_u^{(prod)}}{2\pi} [\bar{\zeta}(z - z_u, \overline{z - z_u}) + \alpha \overline{(z - z_u)} - \beta(z - z_u)] + \sum_{w=1}^{n2} \frac{Q_w^{(inject)}}{2\pi} [\bar{\zeta}(z - z_w, \overline{z - z_w}) + \alpha \overline{(z - z_w)} - \beta(z - z_w)]. \quad (2)$$

Здесь  $n1$  и  $n2$  – число добывающих (мощности  $Q_u$ ) и нагнетательных (мощности  $Q_w$ ) скважин соответственно, размещенных в точках  $z_u$  и  $z_w$  ( $u$  и  $w$  – индексы сумм).

### 3. Методика решения

В ходе рассуждений, описанных в предыдущем разделе, было построено представление о совместном течении нефти и воды в нефтеносном пласте, необходимое для постановки задачи о движении ВНК во времени. Результатом стала математическая модель плоского фильтрационного течения в резервуаре, разрабатываемом двоякопериодической системой нагнетательных и добывающих скважин, размещенных в соответствии с определенной схемой заводнения. С завершением подготовительного этапа решения можно приступить к следующей стадии — формулированию уравнений, описывающих движение ВНК во времени. Здесь следует отметить использованную в работе т. н. модель "разноцветных жидкостей", обеспечивающую простое представление о совместном течении нефти и воды: при описании процесса фильтрации граница раздела вода-нефть полагается бесконечно тонкой. Таким образом, область смешанных жидкостей, образующаяся на краю фронта вытеснения, не учитывается, в отличие от двухфазной модели. Сделанное допущение заметно упростило решение задачи о движении ВНК: в результате водонефтяной контакт совпадает с границей заводненного участка, которая определяется с помощью трассировки нагнетаемой воды. Ниже представлена система для построения следа (или трассера) одной выделенной частицы жидкости в пласте:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{\partial z}{\partial t} &= v(z); \\ z_{t=0} &= z_0 + r_w e^{i\theta}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь  $m$  — пористость пласта,  $z_0$  — центр призабойной зоны радиуса  $r_w$  нагнетательной скважины, сквозь которую в месторождение поступает вода. Выражение для  $v(z)$  совпадает с формулой (2). Угол  $\theta$  используется для построения кривых движения воды: изменяя значение  $\theta$  в диапазоне  $[0, 2\pi)$ , можно перемещаться вдоль края ствола нагнетательной скважины, от одной траектории течения к другой, а величина  $\Delta\theta$  определяет их (траекторий) суммарное число.

Наращивая параметр  $\theta$  с шагом  $\Delta\theta$ , можно построить несколько решений задач Коши, имеющих вид (3): объединение траекторий течения и образует искомую заводненную область, граница которой совпадает с ВНК в выбранный момент времени. Рис. 3 демонстрирует описанную выше технику решения.



Рис. 3. Схема построения ВНК путем объединения нескольких трассеров: каждая траектория течения соответствует решению одной задачи Коши (3)

В качестве переменной интегрирования удобно ввести т. н. безразмерное время  $\tau$ , связанное с реальным  $t$  следующим соотношением:  $\tau = mQt/h|\omega_1^2|$ . Для

решения системы (3) использовались методы Рунге-Кутты, измененные с учетом комплексной природы переменных, входящих в уравнения.

#### 4. Результаты расчетов

Ниже представлен ряд картин фронта заводнения, полученных при обработке схем из рис. 1: круги соответствуют добывающим скважинам, а треугольники — нагнетательным. Для большего удобства местоположение "притоков" (нагнетательных скважин) дополнительно отмечено перекрестием черных сплошных линий. На рис. 4 представлены картины течения закачиваемой в пласт воды, построенные для пятиточечной и однорядной линейной схем расстановки скважин. Первый ряд изображений демонстрирует движение линий тока, вдоль которых осуществлялось интегрирование. Ниже расположены "снимки" заводненной области для каждой схемы в момент прорыва воды в добывающие скважины: время начала обводнения указано в единицах безразмерной величины  $\tau$ .

Результаты для этих и нескольких других схем заводнения качественно сравнивались с изображениями, полученными другими авторами: при этом рассматривались как исключительно модельные расчеты [13], так и итоги экспериментов по изучению совместного течения нефти и воды [5]. Следует отметить качественное совпадение результатов, полученных в настоящей работе, с изображениями из обоих источников. Также было замечено удовлетворительное соответствие наблюдаемого течения его описанию в других работах [14]: нагнетаемая вода с началом процесса распространяется по пласту радиально, после чего ее траектории искривляются, образуя мысы, направленные в сторону добывающих скважин. Подобное поведение придает своеобразие картинам заводненной области: к моменту начала обводнения ВНК имеет характерные изгибы, размещенные между "водными языками", протянутыми к добывающим скважинам. Рис. 4 наглядно демонстрирует описанный характер течения.

Оценочный потенциал полученного решения включает как качественный, так и количественный аспекты сравнения. При использовании предлагаемого программного средства возможен сравнительный анализ различных схем заводнения, включая как визуальную, так и строго числовую оценку. При этом в качестве числовых критериев в настоящий момент приняты *время начала обводнения добывающих скважин*, после которого вычислительные операции следует прекратить<sup>3</sup>, а также *коэффициент охвата по площади (Кохват)*<sup>4</sup>.

Учет первого параметра осуществлялся с помощью введенного ранее безразмерного времени  $\tau$ . Для подсчета Кохвата использовалось свойство гладкости границы раздела вода-нефть, сохраняющейся вплоть до момента прорыва воды в добывающие скважины: заводненный участок аппроксимировался набором выпуклых четырехугольников, площади которых далее рассчитывались с помощью формул векторного произведения, как показано на рис. 5. На изображении представлен четырехугольник  $Z_{i,k} Z_{i+1,k} Z_{i+1,k+1} Z_{i,k+1}$  площади  $S$ , построенный на точках — "следах", оставленных водой в процессе трассировки в моменты времени  $t_k$  и  $t_{k+1}$ .

<sup>3</sup>В рамках предлагаемого решения необходимым условием его применения является гладкость границы раздела вода-нефть, которая сохраняется вплоть до начала обводнения добывающих скважин.

<sup>4</sup>Кохват представляет собой отношение площади, занятой нагнетаемой водой, к площади всего элемента схемы заводнения, и используется для оценки неизвлекаемых нефтяных запасов [1].

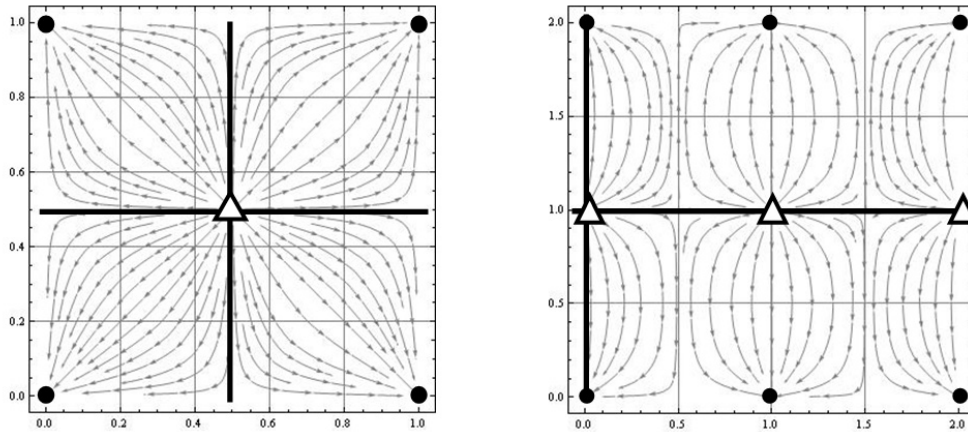


Схема линий тока

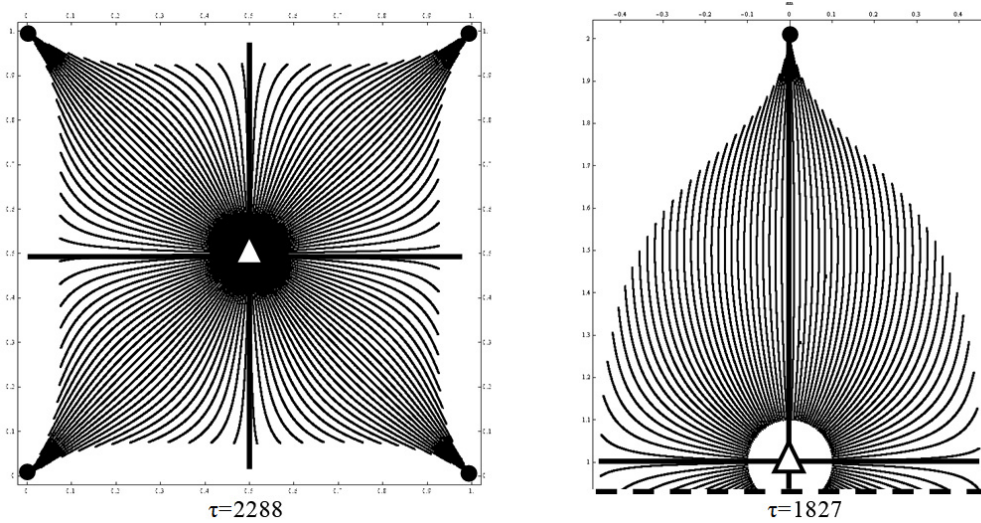


Рис. 4. Картины фронта заводнения, построенные для пятиточечной (левый столбец рисунков) и однорядной линейной (правый столбец рисунков) схем расстановки скважин. Значения  $\tau$  отражают время начала обводнения. Траектории движения жидкости обозначены кривыми, направленными от нагнетательных (треугольники) скважин к добывающим (кружки)

Разбивая полученную фигуру на два образующих ее треугольника, можно вычислить значение  $S$  по предлагаемой формуле, обведенной в рамку.

Ниже представлен пример сравнения нескольких широко известных схем заводнения с использованием вышеуказанных количественных критериев. На рис. 6 изображен ВНК для пятиточечной (а), семиточечной (б), девятиточечной (в) и лобовой рядной (г) схем в момент прорыва воды в добывающие скважины: обратите внимание на значения времени  $\tau$ .

В таблице внизу собраны значения Кохват, полученные для схем заводнения (а)–(г) в рамках настоящего исследования: для сравнения результатов была до-



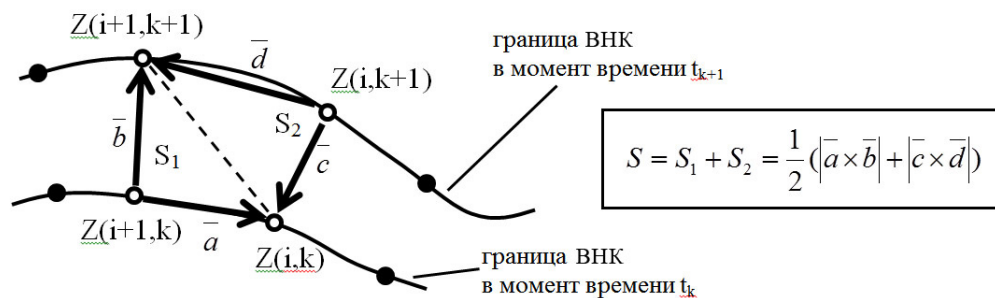


Рис. 5. Схема вычисления площади  $S$  четырехугольника, построенного на "следах" трассеров в соседние моменты времени

бавлена колонка с данными, полученными при анализе графиков из монографии Ф.Ф. Крэйга [14].

Таблица

Результаты вычисления Кохват для схем заводнения (а)—(г)

Схема заводнения	Кохват (тек. исследование)	Кохват ( Ф. Крэйга )
Пятиточечная	71 %	70 %
Семиточечная	74 %	73 %
Девятиточечная	55 %	55 %
Лобовая рядная	57 %	58 %

## Выводы и направления развития исследования

В ходе исследования были последовательно решены все поставленные задачи: результатом проделанной работы стало программное средство, позволяющее проводить качественный и количественный анализ совместного течения нефти и воды при различных схемах расстановки добывающих и нагнетательных скважин. В качестве выходных данных программы можно отметить как графические материалы — картины заводненной области, так и значения числовых характеристик — времени начала обводнения и коэффициента охвата по площади. При этом объектом исследования в программе является выбранная конфигурация скважин в одном элементе, ее геометрия, соотношение мощностей источников и стоков (термины гидромеханики) и т. д. В результате проводимых теоретических сравнений возможно выявление слабых и сильных сторон различных систем заводнения: данные анализа могут применяться при проектировании разработки реальных месторождений в качестве рекомендаций к выбору схемы расстановки скважин из числа возможных вариантов. Известно, что при планировании нефтедобычи с помощью вторичных методов весьма существенную роль играет предварительный анализ состояния пласта и степени его истощенности: во многом свойства участка разработки, его геометрия и геофизические особенности породы, изучаемые на первом этапе проектирования, определяют границы выбора схем расстановки скважин. Однако на следующей стадии планирования необходима сравнительная оцен-

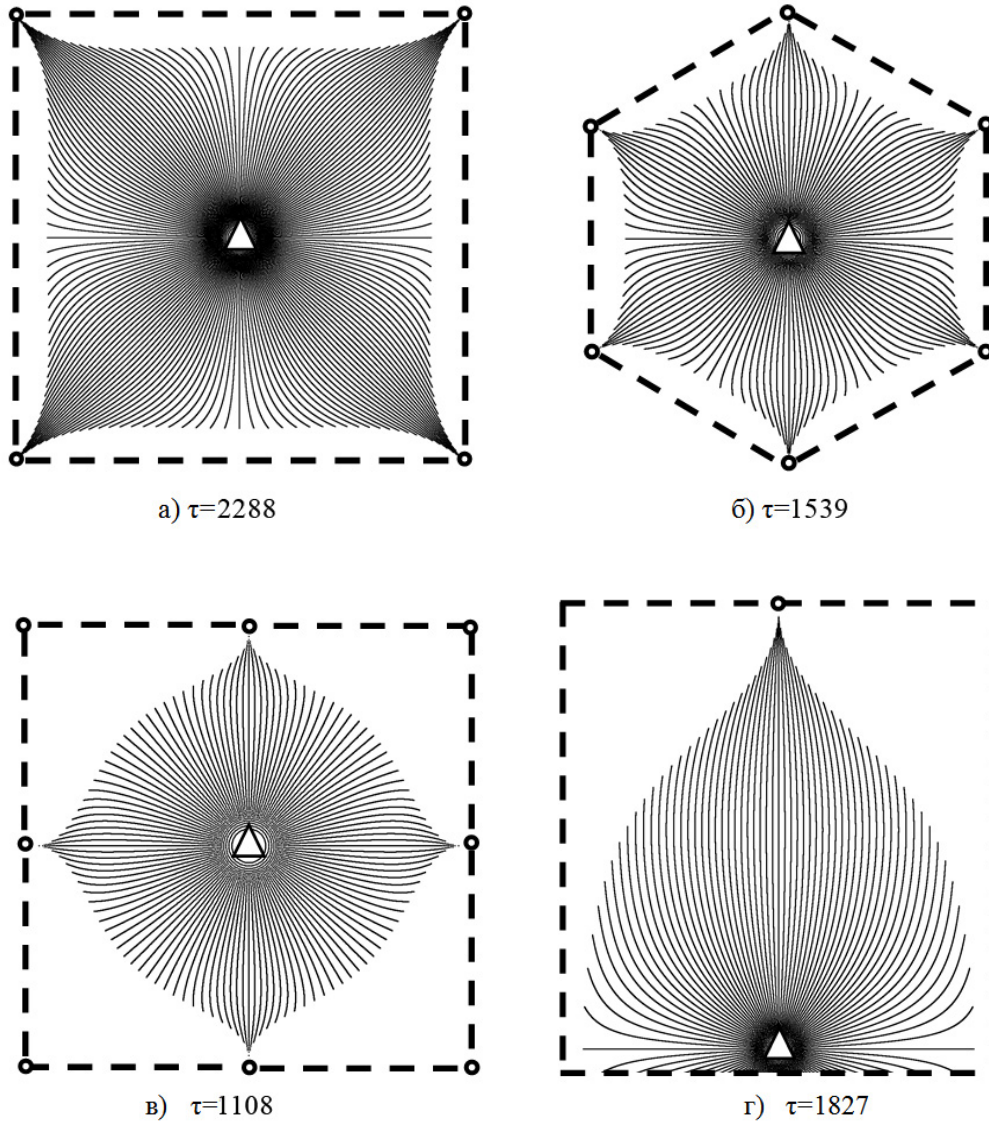


Рис. 6. Сравнительный анализ времени прорыва  $\tau$ : жирный пунктир очерчивает элементы схем заводнения (для лобовой рядной — половину элемента); траектории движения воды обозначены кривыми, направленными от нагнетательных скважин (треугольники) к добывающим (кружки)

ка возможных схем заводнения, устанавливающая прежде всего рентабельность и экономическую оправданность того или иного решения. Именно на этом этапе возможно использование выходных данных предлагаемого решения: проанализировав вероятное поведение фронта заводнения при различных возможных конфигурациях добывающих и нагнетательных скважин, инженер-проектировщик может дополнить этими данными выводы, полученные при исследовании свойств пласта,

что в конечном итоге позволит построить наиболее оптимальную систему разработки для конкретного месторождения.

Несмотря на достаточную завершенность, настоящее исследование располагает большим запасом путей для дальнейшего усовершенствования его составляющих: в частности, необходимо обобщение построенных математических описаний на более сложные случаи, учитывающие различные аспекты совместного течения воды и нефти, а также особенности режимов закачки и откачки жидкости из пласта. Ниже представлен список основных направлений развития предлагаемой работы: результатом планируемых модернизаций должно стать более полное описание фильтрации воды и нефти при заводнении, что приблизит модельные представления, используемые в исследовании, к реалиям нефтедобытчиков.

1. Учет различий в вязкости нефти и воды в процессе их совместного течения.
2. Отказ от постоянства дебитов добывающих и нагнетательных скважин, принятие во внимание особенностей, создаваемых изменениями в объемах закачиваемой воды.

## Литература

- [1] Wolcott D. Waterflooding: Design, Performance and Surveillance methods to optimize rate and reserves. Nefteyugansk: Yukos, 2000. 124 p. = Уолкотт Д. Разработка и управление месторождениями при заводнении: методы проектирования, осуществления и мониторинга, позволяющие оптимизировать темпы добычи и освоения запасов: пер. с англ. маг. геолог. фак-та МГУ Ю.А. Наумова. М., 2001. 144 с.
- [2] Whillhite G.Paul. Waterflooding. SPE Textbook Series, V. 3. Dallas, 1986. 338 p. = Уиллхайт Г. Пол. Заводнение пластов: пер. с англ. Н.В. Романенко. М.: Институт компьютерных исследований, 2009. 788 с.
- [3] Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений: учеб. для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: ОАО Издательство "Недра", 1998. 465 с.
- [4] Герольд С.П. Аналитические основы добычи нефти, газа и воды из скважин. М.; Л.: Нефтеиздат, 1932.
- [5] Muskat M. The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media. Michigan, 1946. = Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде: пер. с англ. М.А. Геймана. М.; Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2004. 628 с.
- [6] Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат, 1963. 396 с.
- [7] Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика: учебное пособие для студентов нефтегаз. спец-тей. М.; Ижевск: РХД, 2001.
- [8] Fay C.H., Prats M. The Application of Numerical Methods to Cycling and Flooding Problems // Proc. Third World Petr. Congress. Sect. II. 1951. P. 555–562.
- [9] Collins R. Flow of Fluids through Porous Materials. N.Y., 1961. = Коллинз Р. Течения жидкостей через пористые материалы: пер. с англ. Р.Л. Салганика. М.: Мир, 1964. 350 с.
- [10] Горбатилов В.А., Костюченко С.В., Пальянов А.П. Технология дискретных закачек — основа для модернизации систем ППД и совершенствования методов заводнения нефтяных залежей // Вестник инжинирингового центра ЮКОС. 2001. № 2. С. 45–53.

- [11] Астафьев В.И., Ротерс П.В. Моделирование двоякопериодических систем добывающих скважин // Вестник СамГУ. Сер.: Естественная наука. 2010. Т. 78. № 4. С. 5–11.
- [12] Астафьев В.И., Ротерс П.В. Моделирование двоякопериодических систем добывающих скважин. 2. Коэффициент продуктивности. // Вестник СамГУ. Сер.: Естественная наука. 2011. Т. 89. № 8. С. 118–127.
- [13] Четверушкин Б.Н., Чурбанова Н.Г., Яковлевский М.В. Моделирование процессов нефтедобычи на многопроцессорных вычислительных системах. М.: МСЦ РАН, 2001.
- [14] Craig Forrest F. The Reservoir Engineering Aspects of Waterflooding, second printing // SPE of AIME. Dallas, 1971. 141 p. = Крэйг Ф.Ф. Разработка нефтяных месторождений при заводнении: пер. с англ. под ред. проф. В.Л. Данилова. М.: Недра, 1974. 192 с.

Поступила в редакцию 18/XI/2013;  
в окончательном варианте — 19/XII/2013.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF WELL LOCATION SCHEMES AT WATERFLOODING

© 2013 A.E. Kasatkin<sup>5</sup>

The main aim of this research is the creation of program tool for quantitative and qualitative comparison of different schemes of well location applied at waterflooding: the estimates were supposed to be carried on the basis of solution of the problem of advancement of border of OWC in time. The achieved results may be used for designing of waterflooding of real oilfields. At the heart of program complex lies the model of infinite homogeneous layer of fixed thickness, the surface of which is covered by doubly periodic grating with upstream and blowing wells in their cells. For describing of the process of combined filtration of water and oil modified Weierstrass dzeta-function was used.

**Key words:** waterflooding, dual periodical lattice, piston-like displacement, oil-water contact, irrigation of wells, areal sweep efficiency.

Paper received 18/XI/2013.

Paper accepted 19/XII/2013.

---

<sup>5</sup>Kasatkin Andrey Evgenievich ([darantion\\_yar@mail.ru](mailto:darantion_yar@mail.ru)), the Dept. of Security of Information Systems, Samara State University, Samara, 443011, Russian Federation.