

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОКОЛОСКВАЖИННЫХ ЗОН ПЛАСТА**

Разработана детальная численная модель околоскважинной зоны пласта, базирующаяся на несогласованных нерегулярных неортогональных разностных сетках различной топологии и позволяющая детально описывать сложные пространственные течения потоков флюидов с учетом геометрии стволов скважин и неоднородности прискважинных зон.

Гидродинамическое моделирование процесса фильтрации флюидов в околоскважинных зонах пласта (ОЗП) с детальным учетом их неоднородности повышает точность определения расчетных показателей работы добывающих скважин. *Особенно это актуально при прогнозировании результатов различных геолого-технических воздействий (ГТВ) на пласт и ОЗП, проводимых с целью регулирования и повышения эффективности разработки залежей.* Уровень достоверности при прогнозировании показателей эффективности ГТВ увеличивается при применении постоянно действующих моделей (ПДМ) залежей за счет более полного учета имеющейся геолого-промысловой информации на стадии выбора и планирования технологий ГТВ. Однако использование моделей пластов в рамках существующих ПДМ, основанных на традиционных конечно-разностных методах, не позволяет детально учесть геометрию ствола скважины, неоднородность ОЗП, сложность околоскважинных потоков и особенности изменения гидродинамического состояния ОЗП в результате ГТВ.

Внутренний диаметр стенок скважин много меньше размеров ячеек, используемых в моделях пластовых систем, что создает большие трудности при гидродинамическом моделировании ОЗП. Это обусловило создание специальных разностных схем с моделированием скважины в узле (блоке) разностной сетки. При этом параметры потока на стенке скважины определяются через параметры потока в блоке, интегрально характеризующего некоторую область возле скважины. Приток к «точечной» скважине по ребрам сетки (через грани блоков) при таком подходе неадекватно описывает приток к реальной скважине (не учитывается, например, радиальность притока флюидов). В области разработки этих схем можно выделить два основных подхода, учитывающих особенности течения возле «точечной» скважины: введение поправочных множителей в коэффициенты разностных уравнений, относящихся к скважине, и локальное сгущение сетки в окрестности скважины.

Первый подход, названный CCF-метод (Completion Connection Factor), развитый в работах Г.Г. Вахитова, А.А. Писмана, В.Г. Каряя, А.Н. Каземи, основан на нахождении связи между забойным давлением скважины и

давлением в ячейке численной модели и на предположении, что течение в области возле скважины одномерное радиальное стационарное однофазное. Однако такие предположения не всегда выполняются (например, предположение о стационарности и однофазности потока не выполняется при высоких скоростях изменения насыщенностей в околоскважинной области, а предположение о радиальном притоке – при наличии неоднородности околоскважинной области), что приводит к существенным ошибкам при определении расчетных значений обводненности, газового фактора и дебита скважины.

Альтернативным первому подходу является LGR-метод (Local Grid Refinement), основанный на предположении, что погрешность любой дискретной схемы прямо пропорциональна размеру использованных блоков (О. К. Розенберг, В. В. Освальдо и др.). В этом случае декартова сетка для залежи используется совместно с «произвольной» (радиальной, эллиптической) детальной ортогональной сеткой в околоскважинной области, которая расположена в одном или более блоках декартовой сетки. Детальные модели скважин, основанные на LGR-методе, используются многими исследователями, в том числе в зарубежных и отечественных коммерческих программных продуктах по гидродинамическому моделированию, в следующих случаях:

- моделирование локальных эффектов (конусообразование воды и газа, обводнение);

- моделирование горизонтальных скважин; получение скважинных псевдофункций;

- получение корректного распределения давления возле скважины; детальный учет изменения каких-либо свойств в ОЗП;

- проведение детализации исследуемой области без нежелательного измельчения глобальной сетки.

LGR-метод дает более реалистичное представление о геометрии течения и происходящих процессах вблизи скважины, однако при его использовании возникает ряд проблем:

- необходимо использовать другую систему координат и метод дискретизации дифференциальных уравнений, отличный от метода, используемого для регулярной глобальной ортогональной сетки, что усложняет алгоритмы получения потоковых коэффициентов между узлами (блоками); нужно использовать простые способы сопряжения сеток различной геометрии и различных размеров, что затруднительно при сложных траекториях и форме стенки скважины;

- наличие блоков малых размеров вблизи скважины существенно ограничивает временной шаг, необходимый для сходимости уравнений или обеспечения заданной точности решения в задачах многофазной фильтрации;

- при большом числе скважин может быть получено слишком большое число блоков, что существенно увеличит размерность задачи и затруднит вычисления.

Для создания модели околоскважинной зоны пласта как объекта воздействия необходимо использовать подход, который позволяет более

эффективно описать геометрию ствола скважины, неоднородность ОЗП, особенности изменения гидродинамического состояния ОЗП в результате ГТВ. Это возможно при использовании разностных схем на нерегулярных разностных сетках (А.А. Самарский). На необходимость отказа от регулярных сеток и применения методов типа конечных или граничных элементов указывалось многими исследователями. Данный подход не имеет части проблем, связанных с простой геометрией блоков сетки в LGR-методе, а именно: для дискретизации дифференциальных уравнений (ДУ) на сетке с различной геометрией блоков используется один метод, учитывающий форму, размеры и неортогональность разностных ячеек; при построении гибридной сетки можно согласовывать ее геометрию с ожидаемой конфигурацией течения и формой стенки скважины и пласта, что позволяет меньшим числом блоков описать особенности фильтрации при заданной точности; сопряжение сеток различной геометрии и различных размеров производится значительно проще в силу большего произвола в выборе формы и размеров блоков локальной сетки.

Сложность решения задач с подобными сетками связана со сгущением их в окрестности скважины, а также с произвольной их геометрией: более сложный метод дискретизации ДУ (получения потоковых коэффициентов); наличие нерегулярной структуры разреженной матрицы при решении системы линейных алгебраических уравнений и применение специальной схемы ее хранения; применение высокоэффективных методов решения систем нелинейных ДУ многофазной фильтрации.

Эти недостатки ограничивали широкое применение метода, однако он применялся многими исследователями для моделирования комплексных (сложных) резервуаров в двумерной двухфазной постановке (О.О. Чавент, А.В. Кохен, М.П. Джеффри, Л.В. Юмарт, Д.Р. Форсайт, А.А. Дарлов и др.), в однофазной трехмерной (В.В. Гурчан), трехмерной многофазной постановке (А.С. Фунг, В.О. Хайберт, В.П. Йотов). Реализация современных эффективных численных методов и использование высокопроизводительной вычислительной техники позволили применить данный подход для создания модели околоскважинной зоны пласта, рассматриваемой в настоящей работе.

Для математического описания большинства физических процессов, происходящих в нефтяных залежах при их разработке, применима модель трехмерной изотермической трехфазной трехкомпонентной нестационарной фильтрации сжимаемого флюида в неоднородной анизотропной по проницаемости деформируемой пористой среде, реализованная во многих коммерческих программных продуктах по гидродинамическому моделированию (ECLIPSE, MORE, VIP, FRAGOR, LAURA) – модель «нелетучей» нефти, полученная из обобщенных уравнений фильтрации Маскега–Мереса при пренебрежении растворимостью отдельных компонентов в фазах. В рамках модели «нелетучей» нефти возможен учет гравитационных, капиллярных и вязкостных сил, зависимости свойств фаз (плотность, вязкость, доля компонентов в фазах) и пористой среды (абсолютная и относительная проницаемость, пористость) от давления в фазах и насыщенностей фазами пористой среды. Данная модель фильтрации используется в модели ОЗП:

$$\begin{aligned}
\mathbf{w}_w &= -K\lambda_w^w \nabla(p_o - p_w^c - \rho_w g z), \\
\nabla \cdot \mathbf{w}_w &= m \frac{\partial}{\partial t} (m_r \rho_w S_w) - Q_w^* && \text{в } \Omega \times (0, T], \\
\mathbf{w}_o &= -K\lambda_o^o \nabla(p_o - \rho_o g z), \\
\nabla \cdot \mathbf{w}_o &= m \frac{\partial}{\partial t} (m_r \rho_o S_o) - Q_o^c && \text{в } \Omega \times (0, T], \\
\mathbf{w}_g &= -K(\lambda_g^g \nabla(p_g + p_g^c - \rho_g g z) + \lambda_g^w \nabla(p_w - \rho_g g z)), \\
\nabla \cdot \mathbf{w}_g &= m \frac{\partial}{\partial t} (m_r \rho_o S_o I_g^k + m_r \rho_g S_g) - Q_g^c - Q_g^k && \text{в } \Omega \times (0, T].
\end{aligned}$$

Система дополняется следующими соотношениями:

$$p_o - p_g = p_{ог}^k(S_o), \quad \sum_k S_o^k = 1,$$

и уравнением состояния породы и фаз

$$K = K(x_i) \cdot k^k(p_o), \quad k_\alpha = k(S_\alpha), \quad \mu_\alpha = \mu(p_\alpha), \quad m_\alpha = m(p_\alpha), \quad \rho_\alpha = \rho(p_\alpha), \quad I_g^k = I_g^k(p_o).$$

Граничные условия на стенке добывающей Γ_{prod} и нагнетательной Γ_{inj} скважин:

$$\begin{aligned}
p_o &= p^{f^{(D)}} \text{ на } \Gamma_{prod}^D \text{ при } S_w = S_w^{\max} \text{ на } \Gamma_{inj}^D, \\
(\mathbf{w}_o \cdot \mathbf{n}) &= q_o^{f^s} \text{ на } \Gamma_{prod}^{g\alpha}, \Gamma_{inj}^{g\alpha}, \\
(\mathbf{w}_g \cdot \mathbf{n}) &= q_g^{f^s} \text{ на } \Gamma_{prod}^T,
\end{aligned}$$

начальные условия $p_o = p_o^{init}$, $S_w = S_w^{init}$, $S_g = S_g^{init}$.

Детальное описание околоскважинных особенностей посредством разностных ячеек малого размера обуславливает чрезвычайно большие временные и вычислительные затраты, связанные со снижением устойчивости численных схем при наличии в области моделирования ячеек с малыми размерами. Обычное применение в этом случае неявных схем решения (IMPLISIT-методов), являющихся «безусловно» устойчивыми, сопряжено со значительными вычислительными затратами при обращении нерегулярной разрешающей матрицы с блочными элементами, с наличием ограничений на временные шаги из соображений точности аппроксимации по времени и обеспечения устойчивости итераций по нелинейности в связи со значительными нелинейностями коэффициентов уравнений при временных шагах, значительно превышающих условия устойчивости явных методов. Это существенно снижает эффективность неявных схем. Однако, учитывая тот факт, что изменение давления в ячейках сетки за временной шаг, ограниченный по условию устойчивости численной схемы, незначительно по сравнению с изменением насыщенностей в этих ячейках, имеет смысл разделить временные шаги для уравнений по давлению и насыщенности. Подобные подходы применялись на всем протяжении развития математических методов расчета процессов фильтрации при ограниченных вычислительных мощностях. Поэтому схема пространственно-временной дискретизации математических уравнений модели ОЗП основана на модификации явного (IMPES) и неявного последовательного (SEQ) методов (рассмотренных в работах Г.Б. Азиза,

А.А. Сеттари, Б.В. Шалимова, М.М. Максимова, Л.П. Рыбичкой, В.А. Рождественского и др.), позволяющих разделить решение уравнений для давления (общего потока) и насыщенностей (долей фаз в потоке). Проведенные численные исследования подтвердили эффективность такой модификации численной схемы IMPES и SEQ-методов для задач фильтрации в околоскважинном пространстве.

Для дискретизации трехмерной области вблизи скважины с некоторыми особенностями (трещина ГПП, перфорационные отверстия) автором разработаны специальные алгоритмы, позволяющие разбить область на тетраэдры, четырехугольные и треугольные гексаэдры. В общем случае, например при многозабойной скважине и сложной траектории стволов, на основе метода Делоне разработан способ разбиения ОЗП на тетраэдры (рис. 1). Реализация алгоритма дискретизации в этом случае сводится к следующему:

- 1) задается первый набор узлов, описывающих внешние границы области;
- 2) по данному набору узлов проводится первая (граничная) дискретизация;
- 3) задается окончательный набор узлов, учитывающий геометрию потоков флюидов и стенки ствола скважины;
- 4) по этим точкам дискретизации окончательно строятся тетраэдры. Такой подход позволяет строить экономичную дискретизацию со сгущающимися разностными сетками возле скважины.

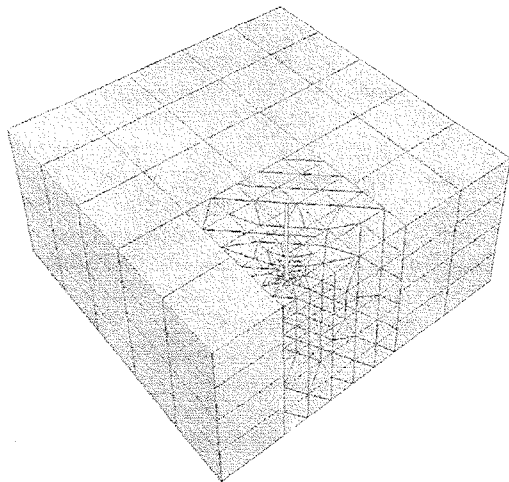


Рис. 1. Сшивка сетки ОЗП скважины сложной траектории с регулярной сеткой пласта

Для построения разностных аналогов дифференциальных уравнений на неортогональных нерегулярных сетках существуют несколько общих методов, таких как вариационный (метод Ритца), вариационно-проекционный (метод Галеркина, метод наименьших квадратов, метод коллокаций и др.),

вариационно-операторные (метод опорных операторов, разработанный А.А. Самарским, А.В. Колдоба, Ю.А. Повещенко) и проекционно-сеточные методы, которые позволяют строить консервативные разностные схемы. Наиболее экономичным с точки зрения скорости и простоты вычисления элементов матрицы разностного аналога ДУ является метод опорных операторов. Поэтому консервативный разностный аналог ДУ для случая многофазной фильтрации строится (Н.А. Шевко) на основе метода опорных операторов с использованием так называемого смешанного конечно-элементного метода (mixed finite element method). В качестве опорного оператора выбран оператор GRAD, который аппроксимируется непосредственно. Для получения определяемого оператора DIV используют соотношения векторного анализа. Для рассматриваемой системы уравнений с учетом неортогональности и возможной несогласованности сеток (несоответствия узлов сеток на поверхности соприкосновения элементов из-за различной топологии или детальности) численный алгоритм (для IMPES-метода) будет иметь следующий вид. Пусть

$$\begin{aligned} V_{hk} &= \{ \mathbf{v} : \mathbf{v}|_{\omega_k} = (v_1, v_2, v_3), v_k - \text{контравар. комп. непрерывные на } \lambda(\omega_N) \}, \\ W_{hk} &= \{ \psi : \psi|_{\omega_N} = \alpha, \alpha \in \mathbf{R} \}, \\ \left(\mathbf{w}_T^{n+1}, \mathbf{w}_{p_{\omega_0}^n}, \mathbf{w}_{p_{g^0}^n}, \mathbf{G}^n \right) \Big|_{\lambda(\omega_N)} &\in V_{hk}, \\ \left(p_o^{n+1}, p_{w_o}^{c,n}, p_{g_o}^{c,n}, z, p_{\Gamma^D}, p_{\Gamma^K}, \lambda_h \right) \Big|_{\omega_N} &\in W_{hk}. \end{aligned}$$

1. По заданным S_α^n на n -м временном слое рассчитывается общее давление на $n+1$ -м слое с шагом, равным dT_ρ , по уравнениям для давления:

$$\begin{aligned} \left(\mathbf{w}_T^{n+1}, \mathbf{u} \right) - \left(p_o^{n+1}, \nabla \cdot \mathbf{u} \right) &= \left(p_{\Gamma^D}, \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \right)_{\Gamma^D} - \left(p_{\Gamma^K}, \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \right)_{\Gamma^K} - \left(\lambda_h, \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \right)_A, \\ \left(\mathbf{w}_{p_{\omega_0}^n}^n, \mathbf{v} \right) &= \left(p_{w_o}^{c,n}, \nabla \cdot \mathbf{v} \right), \quad \mathbf{u}, \mathbf{v} \in V_{hk}, \\ \left(\mathbf{w}_{p_{g^0}^n}^n, \mathbf{s} \right) &= \left(p_{g_o}^{c,n}, \nabla \cdot \mathbf{s} \right), \quad \mathbf{s} \in V_{hk}, \\ \left(\mathbf{G}^n, \mathbf{e} \right) &= \left(z, \nabla \cdot \mathbf{e} \right), \quad \mathbf{e} \in V_{hk}, \\ \left(\nabla \cdot \mathbf{w}_T^{n+1}, \omega \right) &= \left(\beta_T \Delta_t p_o, \omega \right) + \left(A \nabla \cdot \mathbf{w}_{p_{\omega_0}^n}^n, \omega \right) - \left(B \nabla \cdot \mathbf{w}_{p_{g^0}^n}^n, \omega \right) + \\ &\quad + \left(\nabla \cdot \mathbf{G}^n, \omega \right) + \left(Q^n, \omega \right), \quad \omega \in W_{hk}, \\ \left(p_{\Gamma^D}, \phi \right)_{\Gamma^D} &= \left(p_{\Gamma^D}, \phi \right)_{\Gamma^D}, \quad \phi \in W_{hk}, \\ \left(\mathbf{w}_\alpha \cdot \mathbf{n}, \theta \right)_{\Gamma^K} &= \left(q_\alpha, \theta \right)_{\Gamma^K}, \quad \theta \in W_{hk}, \end{aligned}$$

$$\langle \eta_h, \mathbf{w}_T^{n+1} \cdot \mathbf{n} \rangle_{\Gamma_r, A} = -\langle \eta_h, \mathbf{w}_T^{n+1} \cdot \mathbf{n} \rangle_{\Gamma_r, A} \quad \text{для всех } A \in \Gamma_l \cap \Gamma_r, \quad \eta \in W_{hk},$$

где

$$(\mathbf{w}, \mathbf{u}) = \sum_{\Omega} \sum_{\omega \in \{\Omega_E\}} (\mathbf{w} \cdot \mathbf{u})_{\omega_n} V_{\omega_n}, \quad (p, \nabla \cdot \mathbf{u}) = \sum_{\Omega} p_{h_\omega} \sum_{\lambda \in \{\omega_N\}} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_{\lambda},$$

$$\langle p, \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \rangle_{\Gamma} = \sum_{\Omega} p_{h_\omega} \sum_{\lambda \in \{\omega_N\} \in \Gamma} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_{\lambda}.$$

2. Расчет значений насыщенностей S_α^{v+1} на конец ν -го шага размером dt_S n -го временного шага, используя давление p_α^{n+1} для расчета общих потоков

$$\mathbf{w}_T^{n+1} = \mathbf{K} \lambda_T^n \nabla p_o^{n+1}$$

и насыщенностей S_α^v для расчета долей фаз в потоке по уравнениям для водонасыщенности

$$\begin{aligned} (\mathbf{w}_w^{v+1}, \mathbf{u}) &= (f_w^{n+1, v} \mathbf{w}_T^{n+1}, \mathbf{u}) - (p_{w_o}^{c, v} - \rho_w^n g z, \nabla \cdot \mathbf{u}), \\ (C_w^{S_w} \Delta_t S_w, \omega) &= (\nabla \cdot \mathbf{w}_w^{n+1}, \omega) - (C_{wT}^p / C_{wt}^p \Delta_T p_w, \omega) + (Q_w^w, \omega) \end{aligned}$$

и газонасыщенности

$$\begin{aligned} (\mathbf{w}_g^{v+1}, \mathbf{u}) &= (f_g^{n+1, v} \mathbf{w}_T^{n+1}, \mathbf{u}) - (p_{g_o}^{c, v} - H g z, \nabla \cdot \mathbf{u}), \\ (C_g^{S_g} \Delta_t S_g, \omega) &= (\nabla \cdot \mathbf{w}_g^{n+1}, \omega) - (\beta_{g_o} \Delta_T p_o, \omega) - (\beta_{g_g} \Delta_T p_g, \omega) - \\ &\quad - (C_g^{S_o} \Delta_t S_o, \omega) + (Q_g^g, \omega). \end{aligned}$$

Расчет насыщенностей производится до достижения равенства суммы шагов по насыщенности dt_S^v и шага по давлению

$$dT_p = \sum_{\nu} dt_S^{\nu}. \quad (1)$$

3. Проверка допустимости ошибки материального баланса компонентов с использованием давлений p_α^{n+1} и насыщенностей $S_\alpha^{v+1} \equiv S_\alpha^{v+1}$ при соблюдении (1). В случае превышения допустимой величины ошибки шаг $t \in (t^n, t^{n+1})$ считается недопустимым, результаты расчета отбрасываются и величина нового шага уменьшается пропорционально величине превышения фактической ошибки над допустимой. При благоприятном исходе осуществляется переход на следующий временной шаг.

При аппроксимации ДУ при расчете потоков в неоднородной среде коэффициент m и компоненты \mathbf{K} брались средневзвешенными по объему, фазовая проницаемость бралась «вверх по потоку».

Решение системы линейных алгебраических уравнений осуществляется градиентным методом ORTOMIN (усеченный метод ортонормированного

минимума) с предобуславливанием методами Irregular Nested Factorization или ILU.

Рассматриваемая модель реализована в программном продукте WELLSIM. Для проверки правильности программной реализации алгоритмов однофазной и многофазной фильтрации использовались известные аналитические решения стационарной и нестационарной фильтрации.

Условные обозначения:

α – индекс, обозначающий нефтяную, водную и газовую фазы (o, w, g); $K(x_i)$, $m'(x_i)$ – полный тензор абсолютной проницаемости и коэффициент пористости породы в точке пласта с координатами x_i ; $k'(p)$ – множитель к коэффициенту проницаемости как функция давления; p_α , k_α , ρ_α , μ_α , m_α , S_α , l_α^k – соответственно давление, относительная проницаемость, плотность, вязкость, относительная пористость, насыщенность и доля k -го компонента в α -й фазе; t – время; T – продолжительность временного интервала; Q_α^k – мощность источника (стока) k -го компонента, $Q_\alpha^k > 0$ – источник, $Q_\alpha^k < 0$ – сток; $p_{\alpha\beta}^c$ – капиллярное давление между фазами α и β , используем p_{wo}^c , p_{go}^c ; g – ускорение свободного падения; z – глубина залегания пласта; Ω – исходная область; Ω_E – отдельная ячейка сетки, ω_N – узел, σ_B – грань, λ_R – ребро, где индексы E, N, B, R определяют глобальный порядок нумерации соответствующих дескрипторов сетки; $\omega(\Omega_E)$ – узлы, принадлежащие ячейке Ω_E , $\omega_n(\Omega_E)$ – конкретный узел, где индекс n определяет локальный порядок нумерации узлов и т.п. $\lambda_\alpha^k = (k_\alpha \rho_\alpha l_\alpha^k) / \mu_\alpha$ – подвижность компонента k в α -й фазе; $f_w^{n+1,v} = \lambda_w^v(p_o^{n+1}, S_\alpha^v) / \lambda_T^v(p_o^{n+1}, S_\alpha^v)$ – доля воды в потоке, $f_g^{n+1,v} = (\lambda_g^g(p_o^{n+1}, S_\alpha^v) + \lambda_g^o(p_o^{n+1}, S_\alpha^v)) / \lambda_T^v(p_o^{n+1}, S_\alpha^v)$ – доля газа в потоке, $\lambda_T^n = (A\lambda_w^w + C\lambda_o^o + B\lambda_g^g + B\lambda_o^g)^n$, $Q^n = (AQ_w^w + Q_o^o + BQ_g^g + BQ_o^g)^n$, $G^n = AG_w^n + G_o^n + BG_g^n$, $w_{p_{\alpha\beta}^c}^n = K\lambda_w^w \nabla p_{wo}^{c,n}$, $w_{p_{\alpha\beta}^c}^n = K\lambda_g^g \nabla p_{go}^{c,n}$, $G_\alpha^n = K\lambda_\alpha^\alpha \rho_\alpha^n g \nabla z$, где верхний индекс n – n -й временной шаг; Γ_r , Γ_l – поверхности соприкосновения несогласованных (гибридных) сеток;

$$C_w^p = \frac{m}{\Delta t} (m'_p \rho_w^{n+1} + m''_p \rho'_w) S_w^n, C_w^S = \frac{m}{\Delta t} (m_p \rho_w)^{n-1}, C_o^p = \frac{m}{\Delta t} (m'_p \rho_o^n + m''_p \rho'_o) S_o^n,$$

$$C_o^S = \frac{m}{\Delta t} (m_p \rho_o)^{n-1}, C_g^p = \frac{m}{\Delta t} (m'_p (\rho_o l_o^g)^n + m''_p (l'_o l_o^g + \rho_o^{n+1} l'_o)) S_o^n,$$

$$C_g^S = \frac{m}{\Delta t} (m_p \rho_o l_o^g)^{n+1}, C_g^p = \frac{m}{\Delta t} (m'_p \rho_g^n + m''_p \rho'_g) S_g^n, C_g^S = \frac{m}{\Delta t} (m_p \rho_g)^{n+1},$$

$$\beta_w = C_{wT}^p / C_{wT}^p, \beta_T = AC_w^p + CC_o^p + BC_g^{p_n} + BC_g^{p_x}, \beta_{gw} = C_{go}^p / C_{gT}^p,$$

$$\beta_{gs} = C_{gT}^p / C_{gT}^p, A = 1 / C_w^S, B = 1 / C_g^S, C = (1 - C_{go}^S / C_g^S) / C_o^S.$$

Рассматриваемая модель реализована в программном продукте WELLSIM, правильность программной реализации алгоритмов которой проверена аналитическими решениями однофазной и многофазной, стационарной и нестационарной фильтрации.

На основе созданной модели околоскважинной зоны пласта стало возможным решение следующих прикладных задач: приток флюидов к скважинам сложной траектории; приток к многозабойным скважинам и вторым стволам; приток к трещине гидроразрыва; приток к перфорационным каналам; приток при детальном учете неоднородности пласта и прискважинной области; проверка результатов интерпретации гидродинамических исследований скважин.

Получено 08.07.03

УДК 622.276

А.А. Щипанов

ПермНИПИнефть

МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ДЕФОРМИРУЕМОМ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОМ ПЛАСТЕ

Представлена модель двойной пористости/проницаемости, которая позволяет моделировать высокоскоростную фильтрацию по системе трещин и учитывает динамическую деформацию трещинно-порового коллектора, возникающую при изменении пластового давления. Классическая модель единичной пористости сопоставлена с моделью двойной пористости/проницаемости. С помощью математического моделирования определены некоторые особенности фильтрации в трещиновато-пористой среде и влияние обмена между матрицей и трещинами на скорость фильтрации.

В работе рассматривается модель двухфазной фильтрации в среде с двумя видами пустотности, которая известна также как модель двойной пористости/проницаемости [1–3]. Базовой для данной модели является модель фильтрации в среде с одним видом пустотности (единичной пористости), широко известная как модель фильтрации в пористой среде [4].

Уравнения течения однородной жидкости в трещиновато-пористой среде с двумя видами пустотности были сформулированы Г.Н. Баренблаттом и др. [5] исходя из континуального подхода (условия непрерывности). По Баренблатту, обе среды – система трещин и блоки пористой матрицы – рассматриваются как две сплошные среды, вложенные одна в другую, причем параметры движения жидкости и среды определяются в каждой математической точке. Уравнения движения и сохранения массы записываются независимо для каждой среды. Переток жидкости из одной среды в другую учитывается введением функции источника-стока в уравнениях сохранения массы. Подход Г.Н. Баренблатта был распространен на случай многофазной фильтрации Х. Каземи [2].