Прототип гидродинамического симулятора на основе дробно-дифференциальной модификации модели Black Oil

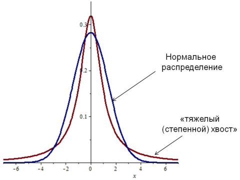
Н. С. Белевцов[1,*], С.Ю. Лукащук[2,*]
nikitabelewtsov@mail.ru[1], lsu@ugatu.su[2]

Научно-исследовательская лаборатория «Групповой анализ математических моделей естествознания, техники и технологий»,
Уфимский государственный авиационный технический университет[*]

Научно-техническая конференция "Цифровые технологии в добыче и переработке углеводородов: от моделей к практике"
6–9 октября 2020 г.

Аномальность фильтрации флюидов в нефтяных пластах

Аномальный диффузионный перенос – перенос вещества, не подчиняющийся гауссовой статистике. Соответствующие функции распределения имеют в этом случае степенную асимптотику (так называемый, тяжелый хвост).

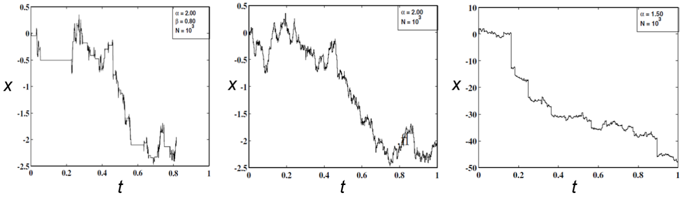


Основная причина аномальности процесса фильтрации в нефтяных пластах — **наличие трещин**, которое может быть обусловлено

- естественной трещиноватостью,
- технологическими мероприятиями на скважинах (гидроразрыв пласта, кислотная обработка и т.д.).

Моделирование процессов фильтрации флюидов в таких пластах — одна из актуальных задач проектирования разработки нефтяных месторождений.

Субдиффузия **Классическая диффузия** **Супердиффузия**



- Основная идея – замена гетерогенной трещиновато-пористой среды на гомогенную с дробно-дифференциальными эффектами степенной памяти.

Математическое и компьютерное моделирование процессов фильтрации в неоднородных коллекторах нефтегазовых месторождений на основе дробно-дифференциального подхода*

Задачи проекта

1. Разработка новых и адаптация существующих дробно-дифференциальных моделей фильтрации.
2. Исследование качественных свойств этих моделей.
3. Разработка численно-аналитических и численных алгоритмов параметрической идентификации моделей.
4. Разработка параллельных алгоритмов компьютерного моделирования на основе разработанных моделей.
5. Создание, отладка и верификация действующих прототипов программных комплексов компьютерного моделирования и параметрической идентификации дробно-дифференциальных фильтрационных моделей.

————

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки 1.3103.2017/ПЧ на 2017–2019 гг.

Закон Дарси с оператором дробного дифференцирования по времени[1,2]:

$$\mathbf{u} = -\frac{k^\alpha}{\mu}\,{}_0^C D_t^\alpha (\nabla p), \quad \alpha \in (0,1). \tag{1}$$

Здесь $\mathbf{u}$ — вектор скорости фильтрующегося флюида, μ — вязкость флюида, k^α — дробный аналог проницаемости пористой среды, p — давление, t — время,

$${}_0^C D_t^\alpha f = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t \frac{f'(\tau)}{(t-\tau)^\alpha}\, d\tau \tag{2}$$

— дробная производная Капуто по времени.

Недостатки модели (1) :

1. отсутствие течения в стационарном режиме;
2. возможность описания только субдиффузионного режима;
3. отсутствие предельного перехода в классический закон Дарси при $\alpha = 0$.

[1] Raghavan R. Fractional Derivatives: Application to Transient Flow // J. Petrol. Sci. Eng. — 2011. — V. 80. — P. 7–13.

[2] Islam, M. R., Hossain, M. E., Mousavizadegan, S. H., Mustafiz, S., Abou-Kassem, J. H. Advanced petroleum reservoir simulation: towards developing reservoir emulators. — Wiley: New Jersey, 2016. — 592 p.

Дробно-дифференциальная модификация закона Дарси

Модель фильтрации, представляющая собой линейную комбинацию классического и дробно-дифференциального уравнений Дарси:

$$\mathbf{u} = -\frac{k}{\mu}\left[\nabla p + k^{\alpha}\,{}_{t_0}\mathscr{D}_t^{\alpha}(\nabla p)\right], \quad \alpha \in (-1,1). \tag{3}$$

1. Дробно-дифференциальный оператор ${}_{t_0}\mathscr{D}_t^{\alpha}$ при $\alpha \in (0,1)$ представляет собой дробную производную Капуто (с дополнительным условием $k^{\alpha} \to 0$ при $\alpha \to 0$).
2. При $\alpha \in (-1,0)$ оператор ${}_{t_0}\mathscr{D}_t^{\alpha}$ представляет собой интеграл дробного порядка:

$$ {}_{t_0}\mathscr{D}_t^{\alpha} f \equiv {}_{t_0}I_t^{-\alpha} f = \frac{1}{\Gamma(-\alpha)} \int_{t_0}^{t} \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1+\alpha}}\,d\tau, \quad \alpha \in (-1,0). $$

3. При $\alpha \in (0,1)$ модель (3) позволяет описывать субдиффузионный режим фильтрации, а при $\alpha \in (-1,0)$ — супердиффузионный.
4. В стационарном режиме процесс фильтрации описывается классическим законом Дарси.
5. Выполняется предельный переход в классический закон Дарси при $\alpha = 0$.

Уравнения массового баланса модели нелетучей нефти[3] (black oil model):

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\phi\frac{S_o}{B_o}\right)+\nabla\left(\frac{\mathbf{u}_o}{B_o}\right)=q_o;$$
$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\phi\frac{S_w}{B_w}\right)+\nabla\left(\frac{\mathbf{u}_w}{B_w}\right)=q_w; \tag{4}$$
$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\phi\left(\frac{S_g}{B_g}+\frac{R_{so}S_o}{B_o}\right)\right]+\nabla\left(\frac{\mathbf{u}_g}{B_g}+\frac{R_{so}\mathbf{u}_o}{B_o}\right)=q_g.$$

Здесь
ϕ — пористость среды;
S_l — насыщенность для фазы l;
B_l — объемный коэффициент фазы l;
$\mathbf{u}_l$ — скорость течения фазы l, $м/с$;
R_{so} — коэффициент растворимости газа в нефти;
q_l — плотность объемных источников (стоков) фазы l при стандартных условиях, c^{-1};
$l=\{o,w,g\}$ — обозначение фазы.

[3] Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. — М.: Недра, 1982. — 407 с.

Обобщение закона Дарси (3) с учетом гравитационных сил и многофазности системы:

$$\mathbf{u}_l = -\frac{k}{\mu_l}\left[k_{rl}\left(\nabla p_l - \rho_l \mathbf{g}\right) + k_{rl}^{\alpha}\ {}_{t_0}\mathscr{D}_t^{\alpha}\left(\nabla p_l - \rho_l \mathbf{g}\right)\right], \qquad l = o, w, g. \tag{5}$$

Здесь
k — тензор проницаемости породы, *Д*;
μ_l — вязкость фазы l, *Па·с*;
k_{rl} — относительная фазовая проницаемость для фазы l;
k_{rl}^{α} — дробный аналог k_{rl}, c^{α};
p_l — давление фазы l, *Па*;
ρ_l — плотность фазы l, *кг/м*^{3};
$\mathbf{g}$ — вектор ускорения свободного падения, *м/с*^{2}.

Замыкающие соотношения:

$$p_{cow} = p_o - p_w, \qquad p_{cgo} = p_g - p_o, \tag{6}$$

$$S_o + S_w + S_g = 1. \tag{7}$$

Система уравнений модели:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\phi\frac{1-S_w-S_g}{B_o}\right) = \nabla\left\{\lambda_{ro}\left[\beta_o(\nabla p_o-\rho_o\mathbf{g})+(1-\beta_o)\ {}_{t_0}\mathscr{D}_t^{\alpha}(\nabla p_o-\rho_o\mathbf{g})\right]\right\}+q_o\equiv F_o; \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\phi\frac{S_w}{B_w}\right)=\nabla\{\lambda_{rw}[\beta_w(\nabla p_o-\nabla p_{cow}-\rho_w\mathbf{g})+$$
$$+(1-\beta_w)\ {}_{t_0}\mathscr{D}_t^{\alpha}(\nabla p_o-\nabla p_{cow}-\rho_w\mathbf{g})\Big]\Big\}+q_w\equiv F_w; \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\phi\left(\frac{S_g}{B_g}+\frac{R_{so}(1-S_w-S_g)}{B_o}\right)\right]=\nabla\{\lambda_{rg}[\beta_g(\nabla p_o+\nabla p_{cgo}-\rho_g\mathbf{g})+$$
$$+(1-\beta_g)\ {}_{t_0}\mathscr{D}_t^{\alpha}(\nabla p_o+\nabla p_{cgo}-\rho_g\mathbf{g})\Big]\Big\}+$$
$$+\nabla\left\{R_{so}\lambda_{ro}\left[\beta_o(\nabla p_o-\rho_o\mathbf{g})+(1-\beta_o)\ {}_{t_0}\mathscr{D}_t^{\alpha}(\nabla p_o-\rho_o\mathbf{g})\right]\right\}+q_g\equiv F_g, \quad (10)$$

где

$$\lambda_{rl}=\frac{k(k_{rl}+k_{rl}^{\alpha})}{\mu_l B_l}, \qquad \beta_l=\frac{k_{rl}}{k_{rl}+k_{rl}^{\alpha}}, \qquad l=o,w,g.$$

Начальные условия:

$$p_o(0,x,y,z) = p_o^0(x,y,z); \quad S_w(0,x,y,z) = S_w^0(x,y,z); \quad S_g(0,x,y,z) = S_g^0(x,y,z).$$

Граничные условия Дирихле на границе (или участке границы) Γ_1:

$$p_l(t,x,y,z)|_{(x,y,z)\in\Gamma_1} = p_l^1, \qquad l = o,w,g.$$

Граничные условия Неймана на границе (или участке границы) Γ_1:

$$(\mathbf{p}_l, \mathbf{n})|_{(x,y,z)\in\Gamma_1} = f_l^1,$$

где $\mathbf{n}$ — вектор внешней нормали к границе Γ_1.

Случай непроницаемой границы Γ_2 (нулевой поток каждой фазы через границу):

$$(\mathbf{u}_l, \mathbf{n})|_{(x,y,z)\in\Gamma_2} = 0.$$

Для насыщенностей их градиент на границе предполагается равным нулю:

$$\left.\frac{\partial S_w}{\partial n}\right|_\Gamma = 0, \qquad \left.\frac{\partial S_g}{\partial n}\right|_\Gamma = 0.$$

Полагаем, что по временной переменной $t \in [t_0, T]$ введена разностная сетка

$$\omega_t = \{t_n : t_n = t_{n-1} + \Delta t_n,\ \ n = 1, \ldots, N,\ \sum_{n=1}^{N} \Delta t_n = T\}. \tag{11}$$

Предполагаются выполненными условия

$$p_{cow}(t) = p_{cow}(t_n), \qquad p_{cgo}(t) = p_{cgo}(t_n), \qquad t \in [t_n, t_{n+1}].$$

Тогда при $t \in [t_n, t_{n+1}]$:

$$\frac{\partial p_o}{\partial t} = \frac{\partial p_w}{\partial t} = \frac{\partial p_g}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t}.$$

Уравнение на давление для $t \in [t_n, t_{n+1}]$:

$$b\frac{\partial p}{\partial t} = F_0 + \frac{B_w}{B_o}F_w + \frac{B_g}{B_o}(F_g - R_{so}F_o), \tag{12}$$

где

$$b = \frac{B_o(\phi' - \Sigma_w B_w' - \Sigma_g B_g') + (\phi - \Sigma_w B_w - \Sigma_g B_g)(R_{so}' B_g - B_o')}{B_o^2},$$

$$\Sigma_w = \phi\frac{S_w}{B_w}, \qquad \Sigma_g = \phi\frac{S_g}{B_g}.$$

Примеры аппроксимации операторов интегро-дифференцирования дробного порядка

Общий вид разностной аппроксимации дробной производной ${}_0\mathscr{D}_t^\alpha f$:

$$
{}_0\mathscr{D}_t^\alpha f(t_{n+1}) \approx \frac{A_0}{(\Delta t_{n+1})^\alpha} f^{n+1} + R_n^\alpha[f], \tag{13}
$$

где A_0 — постоянная, зависящая от выбранного сеточного шаблона, а функция $R_n^\alpha[f]$ является линейной функцией от $f^0, \ldots, f^n$.

1. Случай $\alpha \in (-1, 0)$, т.е. ${}_{t_0}\mathscr{D}_t^\alpha f = {}_{t_0}I_t^{-\alpha} f$.
   - Простейшая квадратурная формула:

$$
({}_{t_0}I_t^{-\alpha} f)(t_n) \approx (S_0^{-\alpha} f)(t_n) = \frac{(t_n - t_0)^{-\alpha}}{\Gamma(1-\alpha)} f^0 + \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \sum_{s=1}^{n} [(t_n - t_{s-1})^{-\alpha} - (t_n - t_s)^{-\alpha}][f(t_s) - f^0].
$$

   - После применения полиномиальной интерполяции функции $f(t)$ между соседними временными шагами:

$$
\begin{aligned}
({}_{t_0}I_t^{-\alpha} f)(t_n) \approx (S_1^{-\alpha} f)(t_n) = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)} \Bigg\{ &(1-\alpha)(t_n - t_0)^{-\alpha} f^0 + (\Delta t_n)^{-\alpha} [f(t_n) - f^0] + \\
&+ \sum_{s=1}^{n-1} \left[\frac{(t_n - t_{s-1})^{1-\alpha}}{\Delta t_s} + \frac{(t_n - t_{s+1})^{1-\alpha}}{\Delta t_{s+1}} - \frac{\Delta t_s + \Delta t_{s+1}}{\Delta t_s \Delta t_{s+1}} (t_n - t_s)^{1-\alpha} \right] \left(f(t_s) - f^0 \right) \Bigg\}.
\end{aligned}
$$

2. Случай $\alpha \in (0, 1)$.
   - Квадратурная формула Грюнвальда-Летникова:

$$
({}_{t_0}D_t^\alpha f)(t_n) \approx \frac{1}{(\Delta t)^\alpha} \sum_{s=0}^{n} B_s^n f(t_n - s\Delta t), \; B_s^n = (-1)^s \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(s+1)\Gamma(\alpha - s + 1)}.
$$

Рассматривается процесс двумерной однофазной фильтрации флюида с постоянными свойствами в гомогенной несжимаемой пористой среде.

Уравнение на давление:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa_\alpha \Delta({}_0D_t^\alpha p), \qquad \alpha \in (-1, 1). \tag{14}$$

Частное аналитическое решение уравнения (14) в единичном квадрате с нулевыми граничными условиями:

$$p(t,x,y) = E_{1-\alpha,1}(-t^{1-\alpha}) \sin\pi x \sin\pi y, \qquad x, y \in [0,1], \quad t \geq 0, \tag{15}$$

где $E_{\gamma,\delta}(z)$ — функция типа Миттаг–Леффлера:

$$E_{\gamma,\delta}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\gamma k + \delta)}.$$

Решение (15) соответствует значению $\kappa_\alpha = (2\pi^2)^{-1}$.

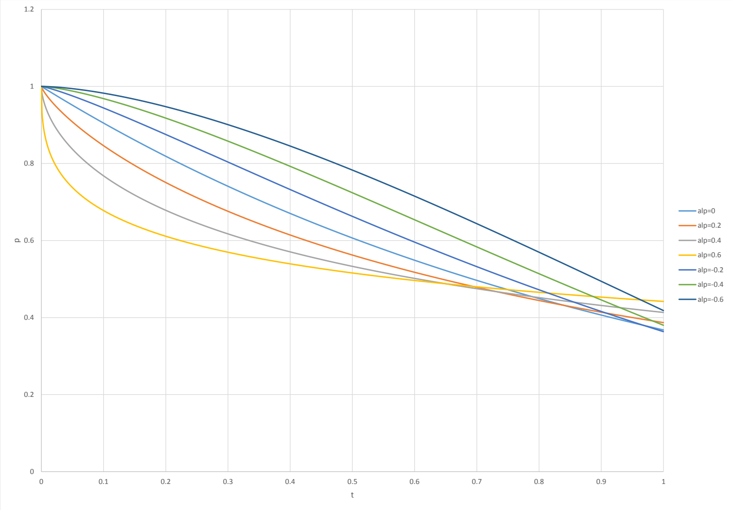


Рис. 1: Эволюция давления (15) в центральной точке расчетной области

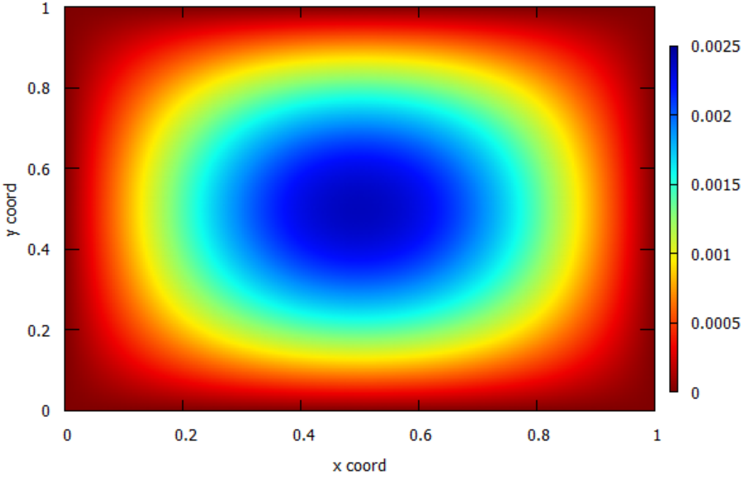


Рис. 2: Поле погрешности давления в момент времени $t = 0.4$ при $\alpha = 0.2$

Зависимость погрешности от размеров расчетной сетки:

Таблица 1: При $t = 0.4$, $\alpha = 0.2$

$\Delta_x \vert \Delta_t$	0.050	0.010	0.005	0.001
0.1	0.0380334	0.0146407	0.00981928	0.00458264
0.05	0.0365080	0.0129791	0.00812879	0.00286082
0.03	0.0361752	0.0126166	0.00775998	0.00248517
0.02	0.0360805	0.0125134	0.00765506	0.00237830

Таблица 2: При $t = 0.4$, $\alpha = 0.6$

$\Delta_x \vert \Delta_t$	0.050	0.010	0.005	0.001
0.1	0.172816	0.109420	0.0880658	0.0513834
0.05	0.171909	0.108467	0.0871041	0.0504184
0.03	0.171711	0.108259	0.0868968	0.0502144
0.02	0.171655	0.108200	0.0868379	0.0501569

Таблица 3: При $\alpha = 0.6$ и переменном шаге по времени

t_0	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
$\Delta_x \vert N_t$	107	154	201
0.1	0.0430772	0.035018	0.0318513
0.05	0.0416415	0.0335514	0.0303737
0.03	0.0413287	0.0332319	0.0300517
0.02	0.0412397	0.033141	0.0299601

Пример 2. Нелинейная двухфазная фильтрация: модель плоского вытеснения. Параметры пласта и флюидов

Размер расчетной области: 400 *м* × 400 *м*;
Пористость среды: $\phi(p) = 0.2\left[1 + c_f(p - 2\cdot 10^7)\right]$, $\quad c_f = 10^{-9}$ Па$^{-1}$;
Проницаемость среды: $k = 400$ мД;
Плотности фаз: $\rho_o^* = 800\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\quad \rho_w^* = 1000\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
Вязкости фаз: $\mu_o = 2.8$ сП, $\quad \mu_w = 0.41$ сП;
Объемные коэффициенты фаз:

$$B_o = \frac{B_o^*}{1 + c_o(p_o - p_o^*)}, \qquad B_w = \frac{B_w^*}{1 + c_w(p_w - p_w^*)},$$

где

$$B_w^* = 1.02, \quad c_o = 1.5\cdot 10^{-9}\ \text{Па}^{-1}, \qquad p_o^* = 2\cdot 10^7\ \text{Па},$$

$$B_o^* = 1.12, \quad c_w = 4.5\cdot 10^{-10},\ \text{Па}^{-1}, \quad p_w^* = 2\cdot 10^7\ \text{Па};$$

Относительные фазовые проницаемости:

$$k_{ro} = \begin{cases} 1, & 0 \le S_w < 0.2; \\ 1.67(0.8 - S_w), & 0.2 \le S_w \le 0.8; \\ 0, & 0.8 < S_w \le 1; \end{cases} \qquad k_{rw} = \begin{cases} 0, & 0 \le S_w < 0.2; \\ 0.417(S_w - 0.2), & 0.2 \le S_w \le 0.8; \\ 0.25, & 0.8 < S_w \le 1; \end{cases}$$

Дробные аналоги относительных фазовых проницаемостей k_{rl}^α:

$$k_{rl}^\alpha = k^\alpha(x, y, z)k_{rl}.$$

Равенство значений безразмерных аналогов коэффициента пьезопроводности во всех экспериментах:

$$\kappa^\alpha \equiv \frac{kk^\alpha T^{1-\alpha}}{L^2} = const, \tag{16}$$

где $L = 400$ *м* — характерный размер расчетной области, $T = 2\cdot 10^6$ *с* — предельное время расчета. Для пласта с классическим законом Дарси было принято значение $k^1 = 1$. Тогда удельная дробная проницаемость коллектора

$$k^\alpha = T^{\alpha-1}.$$

Пример 2. Нелинейная двухфазная фильтрация: модель плоского вытеснения. Начальные и граничные условия

Начальные условия:

$$p(x,y) = (500 - 0.625y)\cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$S_w(x,y) = \begin{cases} 1, & 0 \le x \le 400, \quad 0 \le y \le 100; \\ 0.2, & 0 \le x \le 400, \quad 100 < y \le 400; \end{cases}$$

Граничные условия:

$$p(x,0) = 500\cdot 10^5 \text{ Па}, \qquad p(x,400) = 250\cdot 10^5 \text{ Па},$$

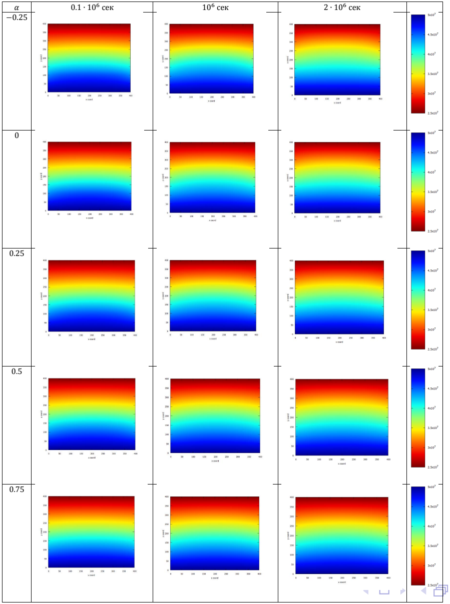
$$p(0,y) = p(400,y) = (500 - 0.625y)\cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$\left.\frac{\partial S_w}{\partial x}\right|_{y=0} = \left.\frac{\partial S_w}{\partial x}\right|_{y=400} = 0, \qquad \left.\frac{\partial S_w}{\partial y}\right|_{x=0} = \left.\frac{\partial S_w}{\partial y}\right|_{x=400} = 0;$$

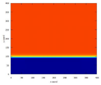
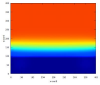
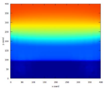
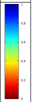
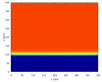
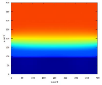
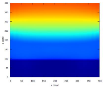
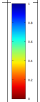
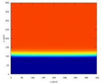
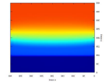
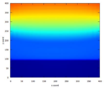
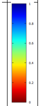
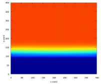
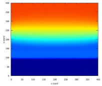
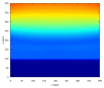
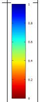
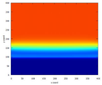
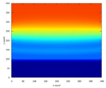
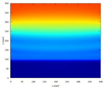
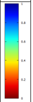
Расчеты проводились на равномерной сетке с параметрами

$$\Delta_x = \Delta_y = 10 \text{ м}, \qquad \Delta_t = 1000 \text{ с}.$$

Пример 2. Нелинейная двухфазная фильтрация: модель плоского вытеснения. Поле давления



Пример 2. Нелинейная двухфазная фильтрация: модель плоского вытеснения. Поле водонасыщенности

α	$0.1 \cdot 10^6$ сек	10^6 сек	$2 \cdot 10^6$ сек	
-0.25				
0				
0.25				
0.5				
0.75				

Пример 3. Нелинейная двухфазная фильтрация: модель с точечным источником. Начальные и граничные условия

Все параметры пласта и флюидов идентичны задаче плоского вытеснения.
Начальные условия:

$$p(x,y) = 250 \cdot 10^5 \ \text{Па}, \qquad S_w = 0.$$

Граничные условия:

$$p(x,0) = p(x,400) = p(0,y) = p(400,y) = 250 \cdot 10^5 \ \text{Па},$$

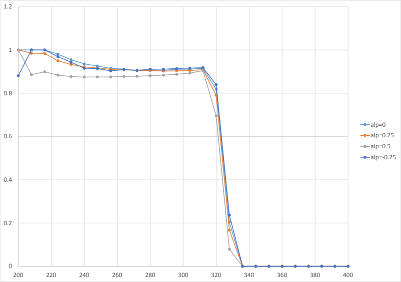
$$\left.\frac{\partial S_w}{\partial x}\right|_{y=0} = \left.\frac{\partial S_w}{\partial x}\right|_{y=400} = 0, \qquad \left.\frac{\partial S_w}{\partial y}\right|_{x=0} = \left.\frac{\partial S_w}{\partial y}\right|_{x=400} = 0.$$

В начальный момент времени в центре расчетной области начинает действовать точечный источник с удельной мощностью

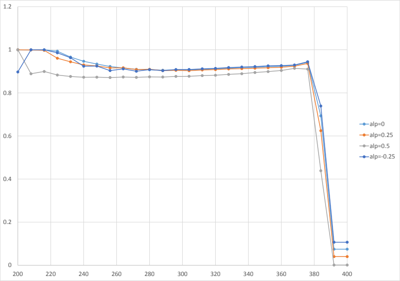
$$q_o = 0, \quad q_w = 7 \cdot 10^{-3} \ \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

который работает в данном режиме до достижения в центральной ячейке значения водонасыщенности $S_w = 1$. После этого режим работы источника меняется таким образом, чтобы поддерживать неизменным это значение водонасыщенности.

Пример 3. Нелинейная двухфазная фильтрация: модель с точечным источником. Распределение водонасыщенности



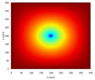
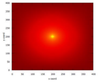
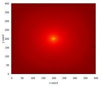
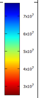
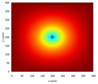
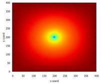
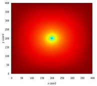
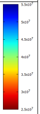
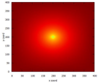
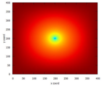
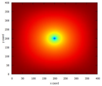
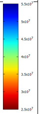
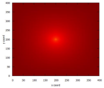
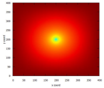
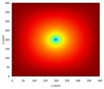
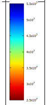
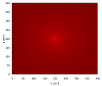
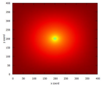
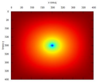
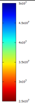
$t = 10^6$ c



$t = 2 \cdot 10^6$ c

Рис. 5: Распределение водонасыщенности по радиусу

Пример 3. Нелинейная двухфазная фильтрация: модель с точечным источником. Поле давления

α	$0.1 \cdot 10^6$ сек	10^6 сек	$2 \cdot 10^6$ сек	
-0.25				
0				
0.25				
0.5				
0.75				

Пример 3. Нелинейная двухфазная фильтрация: модель с точечным источником. Распределение давления

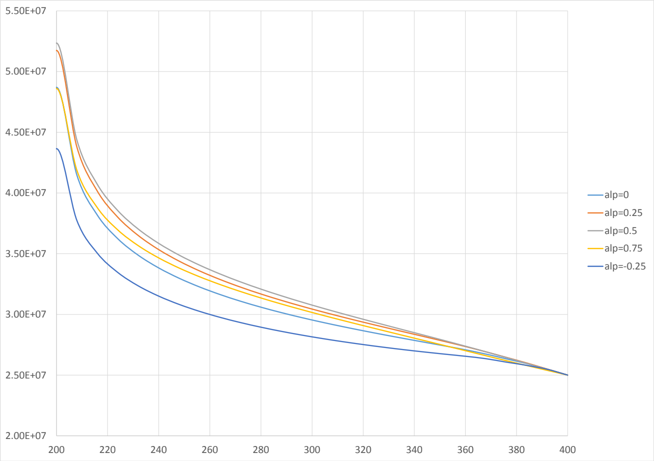


Рис. 7: Распределение давления по радиусу при $t = 2 \cdot 10^6$ c

Пример 3. Нелинейная двухфазная фильтрация: модель с точечным источником. Зависимость мощности источника от времени

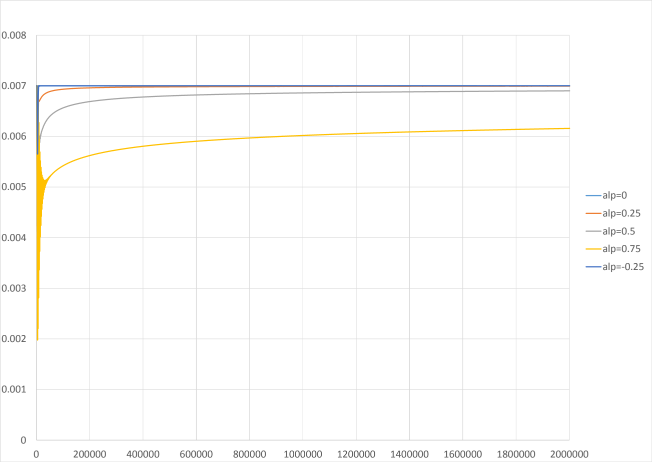


Рис. 8: Зависимость мощности источника от времени

- Создан прототип программного вычислительного комплекса гидродинамического моделирования фильтрационных течений в пластовых системах, обладающих свойством степенной памяти. Прототип основан на дробно-дифференциальном обобщении модели нелетучей нефти (black oil), полученной с использованием дробно-дифференциальной модификации закона Дарси.
- Данная модель позволяет описывать как замедленный (субдиффузионный), так и ускоренный (супердиффузионный) режимы фильтрации.
- Численная реализация модели выполнена на языке C++ по схеме IMPES.
- Для отладки прототипа программного комплекса использованы тестовые задачи с известным точным решением, его возможности продемонстрированы серией вычислительных экспериментов.
- Созданный прототип программного комплекса может быть использован для оценки влияния эффектов памяти на процессы многофазной фильтрации в неоднородных сложных коллекторах с простой геометрией, а также для отработки алгоритмических и программных решений, необходимых для создания полноценного дробно-дифференциального гидродинамического симулятора нефтегазовых месторождений.

Спасибо за внимание!