

Александр Иванович ФИЛИППОВ¹

Оксана Валентиновна АХМЕТОВА²

Алексей Алексеевич КОВАЛЬСКИЙ³

Марат Радикович ГУБАЙДУЛЛИН⁴

УДК 532.546

ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ В СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ*

¹ доктор технических наук, профессор
кафедры общей и теоретической физики,
Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета
filipovai@rambler.ru

² доктор физико-математических наук, заведующая
кафедрой общей и теоретической физики,
Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета
ahoksana@yandex.ru

³ кандидат физико-математических наук, директор,
Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета
aakov68@mail.ru

⁴ младший научный сотрудник НОЦ
«Физика термогазодинамического воздействия на продуктивный пласт»,
Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета
fir_bmf@mail.ru

Аннотация

В статье предложена интерпретационная модель скважинной дебитометрии для слоисто-неоднородных ортотропных пластов с произвольным распределением проница-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 16-08-00728, № 16-08-00548, № 17-48-020517).

Цитирование: Филиппов А. И. Поля скоростей фильтрации в слоисто-неоднородных пластах / А. И. Филиппов, О. В. Ахметова, А. А. Ковальский, М. Р. Губайдуллин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 4. С. 118-130.
DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-118-130

емости в перфорированном слое. В основе этой модели лежит проблема определения поля скоростей в системе «скважина — пласт». Эта проблема сведена к задаче о поле давления в слоисто-неоднородной системе пластов с произвольным распределением компонент проницаемости перфорированного слоя $k_{zd}(z_d)$, $k_{xd}(z_d)$. Аналитическое решение задачи, полученное на основе асимптотического метода «покоэффициентного пространственного усреднения», использовано для восстановления поля скоростей с помощью закона Дарси и реализовано с использованием современных математических программных пакетов. На основе анализа полученных аналитических выражений и вычислительного эксперимента показано, что, несмотря на то что в нулевом приближении профиль давления в перфорированном слое не зависит от вертикальной координаты, поле скоростей существенно определяется распределением проницаемости по толщине перфорированного слоя. В отличие от известных моделей, полученное нулевое приближение учитывает вклад вертикальных межпластовых перетоков из неперфорированной зоны пласта, тем не менее оно не позволяет оценить влияние межпластовых перетоков в перфорированном слое, для оценки вклада которых в статье получено решение задачи о поле давления в первом асимптотическом приближении. Представлены результаты расчетов профиля скорости на выходе из пористой среды для различных практически важных модельных распределений проницаемости. Установлены новые закономерности и особенности формирования профиля скорости. Развита модель открывает перспективы для решения обратных задач, которые могут быть использованы для развития методов интерпретации скважинных дебитограмм.

Ключевые слова

Поле скорости, давление, квазистационарная фильтрация, слоисто-неоднородный пласт, асимптотический метод.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-118-130

Введение

Одним из основных методов исследования скважин и пластов является дебитометрия. Данные о распределении скоростей в интервале перфорации несут важную информацию о свойствах и состоянии пласта [4, 5, 7]. Однако к настоящему времени не создана теория, позволяющая интерпретировать профили притока с достаточной степенью детальности. В классических работах рассматривается фильтрация в слоистых пластах, однако слои изолированы друг от друга, а течение представляется одномерным [2]. Такой подход в принципе исключает возможность межпластовых перетоков, неизбежно возникающих в связи с разнообразием условий, в которых выполняются потокометрические исследования в скважинах, несовершенством вскрытия пластов и т. п. [6].

Для теоретического исследования профиля скоростей необходимо определить аналитические выражения для поля давления в слоисто-неоднородных анизотропных пластах, не вскрытых идеально. Найденное поле давления позволяет определить поле скоростей и теоретически связать его с профилем притока в скважине с помо-

щью закона Дарси. При этом вертикальное распределение проницаемости $kx_d(z_d)$ в теоретической модели должно меняться произвольным образом. Такое требование приводит к тому, что в задачах теории фильтрации возникают переменные коэффициенты, наличие которых создает существенные трудности в поиске решения соответствующих задач. Вообще исследование задач сопряжения, содержащих уравнения с переменными коэффициентами, несмотря на долгую историю, представляет актуальное направление в современной науке. Таким образом, результаты, полученные в статье, представляют общенаучное значение.

В статье рассмотрена задача о поле давления в анизотропном неоднородном пласте, перфорированная часть которого имеет проницаемость, произвольным образом зависящую от вертикальной координаты $k_{xd} = k_{xd}(z_d)$, $k_{zd} = k_{zd}(z_d)$.

Наиболее близкой к рассмотренной является модель фильтрации в трехслойном пласте, центральный слой которого перфорирован [3], однако каждый пропласток считается однородным и изотропным [1]. Аналитических моделей, в которых учитывается как слоистая неоднородность центрального слоя, так и неоднородность фильтрации, не создано.

Основная часть

Рис. 1 иллюстрирует геометрию задачи. Исследуемый пласт условно разбит на три слоя, центральный слой является перфорированным, а окружающие пласты — изолированными от скважины, такое разделение аргументируется тем, что в перфорированной зоне присутствуют вертикальные и горизонтальные потоки, в неперфорированной зоне пласта ($z_d > h$, $z_d < -h$) преобладают вертикальные потоки. Это позволяет упростить задачу, пренебрегая радиальными составляющими скорости в окружающих перфорированный слой породах. Считается, что средняя перфорированная область толщины $2h$ ($-h < z_d < h$), из которой осуществляется отбор нефти, является ортотропно проницаемой в горизонтальном $k_{xd}(z_d)$ и вертикальном $k_{zd}(z_d)$ направлениях, причем ее проницаемость не зависит от координаты x_d . В покрывающем и подстилающем неперфорированных пластах преобладают вертикальные потоки из удаленных зон к перфорированному пласту. По этой причине в окружающей среде можно пренебречь горизонтальными потоками в сравнении с вертикальными, а следовательно, и второй производной по координате x_d в уравнении для окружающей среды [1].

Для простоты рассматривается квазистационарный частный случай. Это означает, что производная от давления P_d по времени τ в уравнении пьезопроводности для центрального участка среды отсутствует. Несмотря на это, время входит в виде параметра в полученное решение для поля давления в центральном пласте через условия сопряжения [1]. Квазистационарная модель является наиболее подходящей для описания полей в пластах малой толщины, поскольку поля давления в них устанавливаются сравнительно быстро. Особо следует отметить случай горизонтальных трещин, заполненных пропантом, расчет поля скоростей в которых с использованием развитой здесь модели приводит к пренебрежимо малым погрешностям.

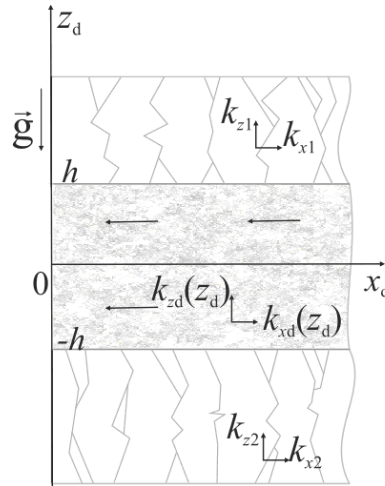


Рис. 1. Геометрия задачи

Fig. 1. The task's geometry

Постановка задачи содержит уравнения пьезопроводности флюида с плотностью ρ в гравитационном поле \vec{g} , направленном противоположно вертикальной оси z_d , для трех слоев [1]:

$$\frac{\partial P_{d1}}{\partial \tau} - \chi_{1z} \frac{\partial^2 P_{d1}}{\partial z_d^2} = 0, \quad \tau > 0, \quad z_d > h, \quad (1)$$

$$k_{xd}(z_d) \frac{\partial^2 P_d}{\partial x_d^2} + \frac{\partial}{\partial z_d} \left[k_{zd}(z_d) \left(\frac{\partial P_d}{\partial z_d} + \rho g \right) \right] = 0, \quad -h < z_d < h, \quad x_d > 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_{d2}}{\partial \tau} - \chi_{2z} \frac{\partial^2 P_{d2}}{\partial z_d^2} = 0, \quad \tau > 0, \quad z_d < -h. \quad (3)$$

Условия равенства давлений и скоростей фильтрации на границах раздела высокопроницаемого пропластка и окружающих проницаемых пород:

$$P_{d1}|_{z_d=h} = P_d|_{z_d=h}, \quad P_{d2}|_{z_d=-h} = P_d|_{z_d=-h}, \quad (4)$$

$$k_{z1} \frac{P_{d1}}{\partial z_d} \Big|_{z_d=h} = k_{zd}(z_d) \frac{\partial P_d}{\partial z_d} \Big|_{z_d=h}, \quad k_{z2} \frac{\partial P_{d2}}{\partial z_d} \Big|_{z_d=-h} = k_{zd}(z_d) \frac{\partial P_d}{\partial z_d} \Big|_{z_d=-h}. \quad (5)$$

Рассмотрен режим заданной депрессии величиной P_{01} в перфорированном пласте:

$$P_d|_{x_d=0} = P_{01} + P_A - \rho g z_d. \quad (6)$$

Значения давления P_d , P_{1d} , P_{2d} на бесконечности и в начальный момент времени соответствуют гидростатическим, а его возмущения отсутствуют [1]:

$$P_{1d}|_{x_d+z_d \rightarrow \infty} = P_{2d}|_{x_d+z_d \rightarrow \infty} = P_d|_{x_d \rightarrow \infty} = P_A - \rho g z_d, \quad (7)$$

$$P_{1d}|_{\tau=0} = P_{2d}|_{\tau=0} = P_A - \rho g z_d. \quad (8)$$

Для простоты окружающие перфорированный пласт породы в задаче считаются полубесконечными. Заметим, что учет вертикальной ограниченности окружающих пород не представляет принципиальных трудностей и сопряжен только с алгебраической громоздкостью.

В нашей предыдущей работе [9] рассмотрен метод, позволяющий решать задачи сопряжения, содержащие переменные коэффициенты. В работе [8] развитый в [9] метод в модификации «покоэффициентного пространственного усреднения» впервые использован для исследования фильтрационных полей в неоднородных анизотропных пластах, когда компоненты проницаемости зависят от пространственных координат.

Решение отыскивалось в безразмерных переменных

$$z = z_d/h, x = x_d/h, t = \tau \chi_{1z}/h^2, \kappa = k_{2z}/k_{1z}, \chi = \chi_{1z}/\chi_{2z}, k_x(z) = k_{xd}(z_d)/k_{1z}, \\ k_z(z) = k_{zd}(z_d)/k_{1z}, P_0 = P_{01}/P_{00}, P_j = (P_{dj} - P_A + \rho g z_d)/P_{00},$$

в виде асимптотической формулы по формальному параметру ε :

$$P = P^{(0)} + \varepsilon P^{(1)} + \varepsilon^2 P^{(2)} + \dots + \varepsilon^n P^{(n)} + \dots \theta, \\ P_1 = P_1^{(0)} + \varepsilon P_1^{(1)} + \varepsilon^2 P_1^{(2)} + \dots + \varepsilon^n P_1^{(n)} + \dots \theta_1, \\ P_2 = P_2^{(0)} + \varepsilon P_2^{(1)} + \varepsilon^2 P_2^{(2)} + \dots + \varepsilon^n P_2^{(n)} + \dots \theta_2. \quad (9)$$

Точное аналитическое решение задачи (1)-(8) в нулевом приближении имеет вид:

$$P^{(0)} = \frac{P_0}{\sqrt{\pi t}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{\xi^2}{4t}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{M}x}{2\sqrt{\xi}}\right) d\xi, \\ P_1^{(0)} = \frac{P_0}{\sqrt{\pi t}} \int_{z-1}^\infty \exp\left(-\frac{\xi^2}{4t}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{M}x}{2\sqrt{\xi-z+1}}\right) d\xi, \\ P_2^{(0)} = \frac{P_0}{\sqrt{\pi t}} \int_{|z+1|\chi_2}^\infty \exp\left(-\frac{\xi^2}{4t}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{M}x}{2\sqrt{\xi-|z+1|\chi_2}}\right) d\xi, \quad (10)$$

где

$$M = \left(k_{1z} + k_{2z} \sqrt{\chi_{1z}/\chi_{2z}}\right) / \left(\frac{1}{h} \int_{-h}^h k_{xd}(z') dz'\right).$$

Из анализа решения (10) следует, что поле давления в нулевом приближении в центральном пласте не зависит от вертикальной координаты. Это означает, что нулевое приближение задачи не позволяет исследовать межпластовые потоки в центральной зоне. Однако оно учитывает приток из неперфорированной части, поскольку в выражение для M входят проницаемости и пьезопроводности окружающих перфорированный пласт пород. Использование модели в нулевом приближении позволяет оценить только осредненные по толщине значения горизонтальной проницаемости, поскольку $k_x(z)$ входит в выражение для

M только в виде интеграла. Проницаемость $k_z(z)$ не входит в решение в нулевом приближении, поэтому она не может быть оценена с помощью развитой модели, если поле давления представлять в нулевом приближении.

Несмотря на указанные ограничения нулевого приближения, следует отметить, что большинство развитых ранее аналитических моделей [2] вообще не учитывают притоков из окружающей перфорированный слой части пласта. В этом смысле даже нулевое приближение рассматриваемой задачи является существенным продвижением.

Из полученного решения следует также, что если для практических расчетов поля давления в трехслойной пористой среде, центральный пропласток которой является неоднородным, достаточно точности нулевого приближения, то возможно пользоваться моделью эквивалентного пласта, центральный пропласток которого является однородным. При этом значение горизонтальной составляющей проницаемости центрального слоя эквивалентного пласта следует принять равным среднеинтегральному значению горизонтальной составляющей проницаемости неоднородного центрального пропластка.

Оценки показывают, что для расчетов поля давления в призабойной зоне погрешность использования модели эквивалентного пласта по сравнению с моделью, учитывающей неоднородность центрального пропластка, меньше 1% при проницаемости пласта меньше 10^{-14} м². При увеличении проницаемости и в первые часы эксплуатации погрешность возрастает, и при проницаемости 10^{-12} м² и времени менее 1 часа погрешность достигает 22%.

Из изложенного выше следует, что для учета вклада межпластовых перетоков в перфорированном слое нулевого приближения недостаточно. Основная информация о вертикальном распределении давления, а следовательно, о вертикальных потоках в центральном слое, содержится в первом асимптотическом коэффициенте. Для поиска аналитических выражений для первого коэффициента использован асимптотический метод в модификации «покоэффициентного пространственного усреднения» [9].

Аналитические выражения для первого коэффициента асимптотического разложения задачи (1)-(8) имеют вид:

$$P^{(1)} = \frac{\Omega(z)P_0}{\sqrt{\pi t}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{\tau^2}{4t}\right) \psi(\sqrt{M}x, \tau) d\tau + \\ + \frac{\Lambda P_0 x}{2\sqrt{\pi t}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{\tau^2}{4t}\right) \frac{1}{\tau} \chi(\sqrt{M}x, \tau) \left(\frac{Mx^2}{2\tau} - 1\right) d\tau, \quad (11)$$

$$P_1^{(1)} = \frac{\Omega(1)P_0}{\sqrt{\pi t}} \int_{z-1}^\infty \exp\left(-\frac{\tau^2}{4t}\right) \psi(\sqrt{M}x, \tau - z + 1) d\tau + \\ + \frac{P_0 \Lambda x}{\sqrt{\pi t}} \int_{z-1}^\infty \exp\left(-\frac{\tau^2}{4t}\right) \frac{1}{2(\tau - z + 1)} \chi(\sqrt{M}x, \tau - z + 1) \left(\frac{Mx^2}{2(\tau - z + 1)} - 1\right) d\tau, \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
P_2^{(1)} = & \frac{\Omega(-1)P_0}{\sqrt{\pi t}} \int_{|z+l|\chi}^{\infty} \exp\left(-\frac{\tau^2}{4t}\right) \Psi\left(\sqrt{M}x, \tau - |z+l|\chi\right) d\tau + \\
& + \frac{\Lambda x P_0}{\sqrt{\pi t}} \int_{|z+l|\chi}^{\infty} \exp\left(-\frac{\tau^2}{4t}\right) \frac{1}{2(\tau - |z+l|\chi)} \times \\
& \times \chi\left(\sqrt{M}x, \tau - |z+l|\chi\right) \left(\frac{Mx^2}{2(\tau - |z+l|\chi)} - 1\right) d\tau,
\end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned}
\Omega(z) = & -M \int_0^z \frac{1}{k_z(z')} \int_0^{z'} k_x(z'') dz'' dz' + \frac{M}{2} \int_{-1}^z \frac{1}{k_z(z')} \int_0^{z'} k_x(z'') dz'' dz' dz + \\
& + \left(\kappa\sqrt{\chi} - M \int_{-1}^0 k_x(z) dz \right) \left(\int_0^z \frac{1}{k_z(z')} dz' - \frac{1}{2} \int_{-1}^z \int_0^z \frac{1}{k_z(z')} dz' dz \right), \\
\Lambda = & \frac{\sqrt{M}}{4\langle k_x \rangle} \left(\int_0^1 \frac{1}{k_z(z')} \int_0^{z'} k_x(z'') dz'' dz' - \kappa\sqrt{\chi} \int_{-1}^0 \frac{1}{k_z(z')} \int_0^{z'} k_x(z'') dz'' dz' + \right. \\
& \left. + M \int_{-1}^1 k_x(z) \int_0^z \frac{1}{k_z(z')} \int_0^{z'} k_x(z'') dz'' dz' dz \right) - \frac{1}{8\sqrt{M}\langle k_x \rangle^2} \times \\
& \times \left[\left(\int_0^1 \frac{1}{k_z(z)} dz + \kappa\sqrt{\chi} \int_{-1}^0 \frac{1}{k_z(z)} dz - M \int_{-1}^1 k_x(z) \int_0^z \frac{1}{k_z(z')} dz' dz \right) \times \right. \\
& \left. \times \left(- \int_{-1}^0 k_x(z') dz' + \kappa\sqrt{\chi} \int_0^1 k_x(z') dz' \right) \right].
\end{aligned}$$

Для случая изолированного центрального пропластка ($k_{1z} = k_{2z} = 0$) первый коэффициент асимптотического разложения (11)-(13) равен нулю. Учитывая этот факт, утверждаем, что вертикальный градиент давления в центральном пропластке обусловлен фильтрационными потоками из окружающих сред. На практике это означает, что если по толщине коллектора давление распределено неравномерно, то этот пласт вскрыт неидеально или в него осуществляется приток из окружающих пород.

Найденные выражения для поля давления позволяют рассчитывать горизонтальную компоненту профиля скорости $v_x = -(k_{xd}(z_d) / \mu) \partial P_d / \partial x_d$ и вертикальную $-v_z = -(k_{zd}(z_d) / \mu) \partial P_d / \partial z_d$, которая отражает вклад межпластовых перетоков, согласно закону Дарси.

Для иллюстрации возможностей развитой модели выполнен вычислительный эксперимент по определению поля скоростей для модельных распределений проницаемости. Результаты этого эксперимента представлены на рис. 2.

Рис. 2а иллюстрирует профиль скорости при следующем распределении проницаемостей: $k_{xd}(z) = (1 - z^2)10^{-11} + 10^{-12}$, м²; $k_{zd}(z) = (1 - z^2)10^{-11} + 10^{-12}$, м;

$k_{xd} = \langle k_{xd}(z) \rangle = 7,667 \times 10^{-12}$, м²; $k_{zd} = \langle k_{zd}(z) \rangle = 7,667 \times 10^{-12}$, м². Рис. 2а демонстрирует отличие профилей скорости для пласта, который был вскрыт идеально и неидеально, а также показывает необходимость учета вертикальной неоднородности пласта.

На рис. 2б представлен профиль скорости в пластах со следующими компонентами проницаемостей: $k_{xd}(z) = z^2 10^{-12} + 10^{-14}$, м²; $k_{zd}(z) = z^2 10^{-12} + 10^{-14}$, м²; $k_{xd} = \langle k_{xd}(z) \rangle = 3,433 \times 10^{-13}$, м²; $k_{zd} = \langle k_{zd}(z) \rangle = 3,433 \times 10^{-13}$, м². Как следует из рис. 2б, неучет распределения проницаемости в центральном пропластке ведет не только к количественной ошибке, но и к качественной.

На рис. 2в изображены профили скоростей в случаях, когда проницаемости пластов заданы следующими компонентами: $k_{xd}(z) = (z^2 - 1)^2 10^{-11} + 2,2 \times 10^{-11}$, м²; $k_{zd}(z) = (z^2 - 1)^2 10^{-11} + 2,2 \times 10^{-11}$, м²; $k_{xd} = \langle k_{xd}(z) \rangle = 2,867 \times 10^{-11}$, м²; $k_{zd} = \langle k_{zd}(z) \rangle = 2,867 \times 10^{-11}$, м².

Несовершенство методов и технических средств измерений потоков флюидов на практике приводит к тому, что профили притока и расхода часто получаются искаженными [6]. Развита модель может быть использована для контроля качества и отбраковки результатов измерений профилей притока в скважинах, если распределение проницаемости в перфорированной зоне определено с помощью

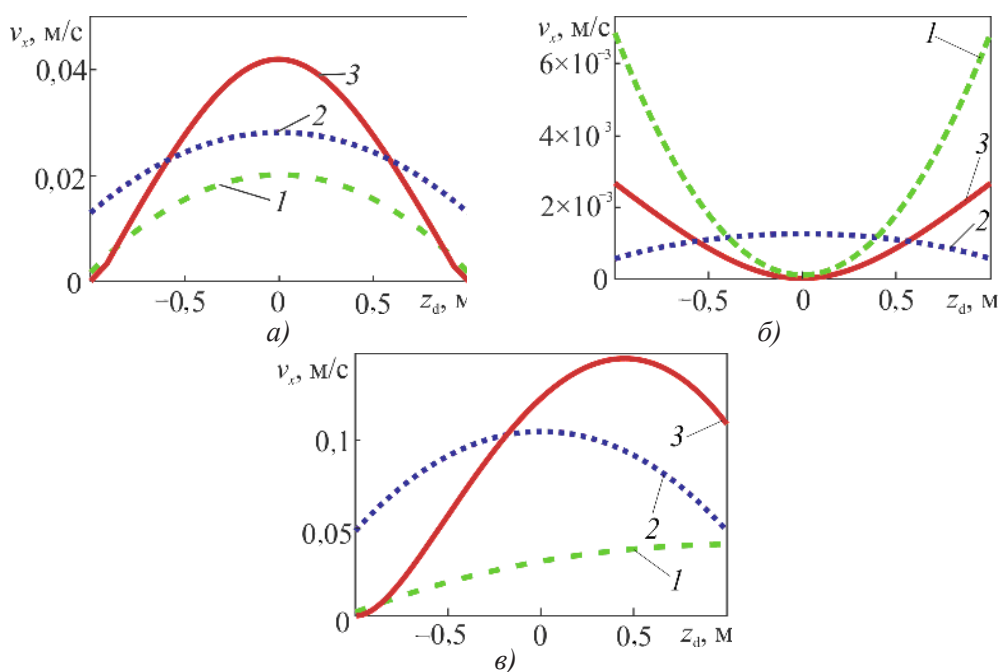


Рис. 2. Сопоставление профилей скорости для изолированного пласта (кр. 1), неизолированного пласта с однородным (кр. 2) и неизолированного пласта с неоднородным (кр. 3) центральным слоем для различных значений проницаемости

Fig. 2. Comparing the speed profiles for an isolated layer (line 1), non-isolated layer with a congeneric central layer (line 2) and non-isolated layer with a non-congeneric central layer (line 3) for different values of permeability

других методов. Критерием достоверности построения этих профилей служит установление соответствия между возможными теоретическими и фактическими скважинными дебитограммами. Качественный показатель соответствия — это схожесть дифференциального профиля и гистограммы проницаемости по керну или данным оценки коллекторских свойств пластов по комплексу ГИС [6]. Из рис 2в следует, что только *кривая 1* (для случаев изолированного перфорированного слоя) коррелирует с распределением проницаемости по толщине центрального пропластка. Этот результат говорит о том, что критерий, описанный выше, справедлив только для пластов, вскрытых идеально. Таким образом, описанный в работе [6] качественный показатель соответствия, согласно рис. 2в, не является достаточно обоснованным.

Попытки создания критериев качества дебитограмм на теоретической основе осуществлялись и ранее. Однако они разработаны для случаев идеального вскрытия пласта и отсутствия притоков из неперфорированных слоев. Как следует из рис. 2, развитый в данной статье метод обеспечивает создание новых способов контроля качества дебитограмм.

Заключение

Наиболее важной сферой применения полученных результатов является решение обратных задач. Действительно, в выражения для первого коэффициента разложения (11)–(13) входят моментные интегралы от функций проницаемости, которые в принципе могут быть определены на основе измеренного профиля притока в интервале перфорации. Решение такого рода обратных задач открывает новые возможности для интерпретации скважинных дебитограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметова О. В. Нулевое асимптотическое приближение в задаче о поле давления с переменными коэффициентами / О. В. Ахметова, М. Р. Губайдуллин, Р. В. Сираев и др. // Естественные и математические науки в современном мире: сб. ст. по матер. XLIII Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2016. № 6 (41). С. 91-99.
2. Басниев К. С. Подземная гидромеханика / К. С. Басниев, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. М.: Недра, 1993. 416 с.
3. Ентов В. М. Поле давления вокруг скважины в слоисто-неоднородном пласте / В. М. Ентов, Е. М. Чехонин // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2007. № 1. С. 83-90.
4. Ипатов А. И. Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов / А. И. Ипатов, М. И. Кременецкий. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»: Институт компьютерных исследований, 2006. 780 с.
5. Коноплев Ю. В. Геофизические методы контроля разработки нефтяных месторождений / Ю. В. Коноплев, Г. С. Кузнецов, Е. И. Леонтьев и др. М.: Недра, 1986. 221 с.

6. Косарев В. Е. Контроль за разработкой нефтяных и газовых месторождений: пособие для самостоятельного изучения для слушателей курсов повышения квалификации специальности «Геофизика» / В. Е. Косарев. Казань: Казанский гос. ун-т, 2009. 145 с.
7. Кузнецов Г. С. Геофизические методы контроля разработки нефтяных и газовых месторождений: уч. для вузов / Г. С. Кузнецов, Е. И. Леонтьев, Р. А. Резванов. М.: Недра, 1991. 223 с.
8. Филиппов А. И. Асимптотический метод по коэффициентному осреднению в задаче о поле давления в неоднородном трехслойном пласте / А. И. Филиппов, О. В. Ахметова, А. А. Ковальский, М. Р. Губайдуллин // Современные проблемы математической физики и вычислительной математики: тезисы докладов международной конференции. М.: МГУ имени М. В. Ломоносова: МАКС Пресс, 2016. С. 248.
9. Филиппов А. И. Метод по коэффициентному осреднению в задаче о ламинарном течении газа в скважине / А. И. Филиппов, О. В. Ахметова, А. А. Ковальский // Прикладная механика и техническая физика. 2018. № 1. С. 71-82.

Alexander I. FILIPPOV¹

Oksana V. AKHMETOVA²

Alexey A. KOVALSKY³

Marat R. GUBAIDULLIN⁴

UDC 532.546

FIELDS OF FILTRATION RATES IN LAYERED HETEROGENEOUS BEDS*

¹ Dr. Sci. (Tech.), Professor-Consultant, Department of General and Theoretical Physics,
Sterlitamak Branch of Bashkir State University
filippovai@rambler.ru

² Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department of General and Theoretical Physics,
Sterlitamak Branch of Bashkir State University
ahoksana@yandex.ru

³ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Director, Sterlitamak Branch of Bashkir State University
aakov68@mail.ru

⁴ Junior Research Associate,
REC "Physics of Thermogasdynamic Impact on Productive Reservoir",
Sterlitamak Branch of Bashkir State University
fir_bmf@mail.ru

Abstract

This article proposes an interpretation model of well logging for layered heterogeneous orthotropic formations with an arbitrary permeability distribution in the perforated layer. This model relies on the problem of determining the velocity field in the well-layer system. This problem is reduced to the problem of the pressure field in a layered inhomogeneous formation system with an arbitrary distribution of permeability components of the perforated layer $k_{zd}(z_d)$,

* The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research
(No 16-08-00728, No 16-08-00548, No 17-48-020517).

Citation: Filippov A. I., Akhmetova O. V., Kovalsky A. A., Gubaidullin M. R. 2018. "Fields of Filtration Rates in Layered Heterogeneous Beds". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 4, no 4, pp. 118-130.
DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-118-130

$k_{xd}(z_d)$. The analytical solution of this problem was obtained on the basis of the asymptotic method of “stepwise spatial averaging”. It was then employed to reconstruct the velocity field using the Darcy law; it was realized using modern mathematical software packages.

Based on the analysis of the obtained analytical expressions and the computational experiment, the authors show that the velocity field is essentially determined by the permeability distribution over the thickness of the perforated layer, even though in the zero approximation, the pressure profile in the perforated layer does not depend on the vertical coordinate. In contrast to the known models, the zero approximation obtained takes into account the contribution of vertical interstitial overflows from the unperforated zone of the formation. Nevertheless, it does not allow estimating the effect of interplastic overflows in the perforated layer and their contribution to the solution of the pressure field problem in the first asymptotic approximation.

The results of calculations of the velocity profile at the exit from a porous medium for various practically important model distributions of permeability are presented. New regularities and features of the formation of the velocity profile are established. The developed model opens up prospects for solving inverse problems that can be used to develop methods for interpreting well logs.

Keywords

Fields of speeds, pressure, layered heterogeneous reservoir, asymptotic method.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-118-130

REFERENCES

1. Akhmetova O. V., Gubaydullin M. R., Sirayev R. V. et al. 2016. “Nulevoye asimptoticheskoye priblizheniye v zadache o pole davleniya s peremennymi koeffitsiyentami” [Zero Asymptotic Approximation in the Problem of a Pressure Field with Variable Coefficients]. In: Yestestvennyye i matematicheskiye nauki v sovremennom mire: sb. st. po mater. XLIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf., no 6 (41), pp. 91-99. Novosibirsk: SibAK.
2. Basniev K. S., Kochina I. N., Maksimov V. M. 1993. Podzemnaya gidromekhanika [Underground Hydromechanics]. Moscow: Nedra.
3. Entov V. M., Chekhonin E. M. 2007. “Pole davleniya vokrug skvazhiny v sloistoneodnorodnom plaste [Field of Pressure Around a Borehole in a Layered Heterogeneous Formation]. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza, no 1, pp. 83-90.
4. Ipatov A. I., Kremenetskiy M. I. 2006. Geofizicheskiy i gidrodinamicheskiy kontrol' razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodov [Geophysical and Hydrodynamic Control of Development of Hydrocarbon Deposits]. Moscow: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika; Institut komp'yuternykh issledovaniy.

5. Konoplev Yu. V., Kuznetsov G. S., Leontyev E. I et al. 1986. Geofizicheskie metody kontrolya razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy [Geophysical Methods of Control over the Development of Oil Fields]. Moscow: Nedra.
6. Kosarev V. Ye. 2009. Kontrol' za razrabotkoy neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy [Control over the Development of Oil and Gas Fields]: posobiye dlya samostoyatel'nogo izucheniya dlya slushateley kursov povysheniya kvalifikatsii spetsial'nosti "Geofizika". Kazan: Kazanskiy gosudarstvennyy universitet.
7. Kuznetsov G. S., Leontyev E. I., Rezvanov R. A. 1991. Geofizicheskie metody kontrolya razrabotki neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy. Uch. Dlya vuzov [Geophysical Methods of Control over the Development of Oil and Gas Fields]. Moscow: Nedra.
8. Filippov A. I., Akhmetova O. V., Kovalskiy A. A., Gubaydullin M. R. 2016. "Asimptoticheskiy metod pokoeffitsientnogo osredneniya v zadache o pole davleniya v neodnorodnom trekhsloynnom plaste" [Asymptotic Method for the Coefficientwise Averaging in the Problem of the Pressure Field in an Inhomogeneous Three-Layer Reservoir]. Proceedings of the International Conference "Sovremennyye problemy matematicheskoy fiziki i vychislitel'noy matematiki". Moscow: Lomonosov Moscow State University; MAKS Press.
9. Filippov A. I., Akhmetova O. V., Kovalskiy A. A. 2018. "Metod pokoeffitsientnogo osredneniya v zadache o laminarnom techenii gaza v skvazhine" [The Method of Stepwise Averaging in the Problem of Laminar Flow of Gas in a Well]. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika, no 1, pp. 71-82.