

УДК 517.958:532

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ПРИТОКА ЖИДКОСТИ К ЛУЧЕВОЙ СИСТЕМЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

П. Е. Морозов

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН,  
420111 Казань, Россия  
E-mail: morozov@imm.knc.ru

Предложен полуаналитический метод определения продуктивности лучевой системы горизонтальных скважин в анизотропном пласте. Результаты расчетов продуктивности и распределения притока жидкости по длине стволов лучевой системы горизонтальных скважин с использованием предложенного метода сравниваются с данными экспериментальных исследований на основе электролитического моделирования и расчетов по инженерным формулам. Исследовано влияние числа стволов, их расположения в пласте, а также гидравлических потерь давления на распределение притока жидкости по длине стволов горизонтальных скважин.

**Ключевые слова:** полуаналитическое решение, лучевая система, горизонтальные скважины, анизотропный пласт, профиль притока, продуктивность.

DOI: 10.15372/PMTF20180210

**Введение.** В настоящее время технология горизонтального бурения широко используется при разработке месторождений нефти и газа [1, 2]. Основным преимуществом бурения горизонтальных скважин является увеличение области дренирования за счет увеличения площади контакта с пластом-коллектором. Радиальное или веерно-кустовое размещение горизонтальных скважин применяется при освоении шельфовых месторождений с использованием морских платформ, а также для создания подземных хранилищ газа. Перспективной технологией, позволяющей интенсифицировать добычу нефти, является радиальное вскрытие пласта. Эта технология основана на создании в вертикальных скважинах методом гидроэрозионного разрушения нескольких радиальных каналов диаметром  $3\div 5$  см и протяженностью до 100 м. Другим примером радиальных систем горизонтальных скважин являются лучевые водозаборы, которые начиная с 40-х гг. XX в. применяются для интенсификации добычи воды из водоносных пластов [1, 3].

Большинство известных инженерных формул для определения продуктивности одиночных горизонтальных скважин и их систем получены в предположении равномерности притока жидкости по стволам скважин [1–5]. Однако результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что характер распределения притока по длине горизонтальных скважин зависит от ряда факторов, таких как расположение скважин в пласте, их размеры, количество, а также от гидравлических условий течения в них жидкости [3, 6].

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-05-00861).

© Морозов П. Е., 2018

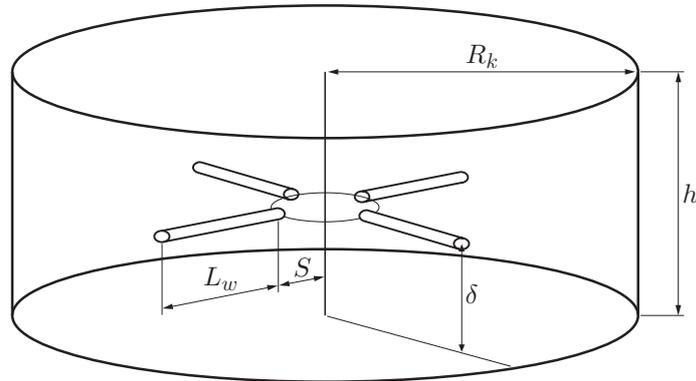


Рис. 1. Лучевая система горизонтальных скважин

Важное значение имеет также тот факт, что вследствие интерференции увеличение количества стволов не приводит к пропорциональному увеличению продуктивности лучевой системы горизонтальных скважин [5].

**Полуаналитическое решение задачи.** Рассмотрим стационарный приток несжимаемой жидкости к лучевой системе горизонтальных скважин, состоящей из  $N$  симметрично расположенных на расстоянии  $\delta$  от подошвы стволов длиной  $L_w$  в анизотропном пласте толщиной  $h$  с непроницаемыми кровлей и подошвой (рис. 1). Пусть горизонтальные скважины начинаются на окружности радиусом  $S$ , заканчиваются — на окружности радиусом  $S + L_w$ . Предположим, что на удаленном круговом контуре радиусом  $R_k > S + L_w$  поддерживается постоянное давление  $p_k$ . Необходимо определить забойное давление  $p_c$  при известном суммарном дебите лучевой системы горизонтальных скважин  $Q$  или, наоборот, дебит  $Q$  при известном забойном давлении  $p_c$ .

Рассмотрим случай равномерного распределения давления по стволам горизонтальных скважин, т. е. без учета потерь давления на трение. Для решения задачи используем решение М. Маскета для точечного источника в анизотропном пласте, ограниченного двумя параллельными непроницаемыми плоскостями. После интегрирования элементарных источников с плотностью расхода  $q$  вдоль осей стволов горизонтальных скважин в предположении равенства давления на цилиндрических поверхностях стволов скважин и в силу симметрии задачи получаем систему интегральных уравнений для определения безразмерного давления в лучевой системе горизонтальных скважин [7]:

$$p_d(x_d) = \int_{S_d}^{1+S_d} q_d(\alpha) F(x_d, \alpha) d\alpha; \quad (1)$$

$$\int_{S_d}^{1+S_d} q_d(\alpha) d\alpha = \frac{1}{N}, \quad (2)$$

где

$$F(x_d, \alpha) = \sum_{i=0}^{N-1} \left( \ln \frac{r_{ed}}{\rho_i} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} K_0(\rho_i \xi_m) \cos \xi_m \delta_d \cos \xi_m (\delta_d + r_{cd}) \right),$$

$$x_d = \frac{x}{L_w}, \quad p_d = \frac{2\pi h k_h}{\mu Q} (p_k - p_c), \quad r_{ed} = \frac{R_k}{L_w}, \quad h_d = \frac{\beta h}{L_w}, \quad \delta_d = \frac{\beta \delta}{L_w}, \quad r_{cd} = \frac{r_c(\beta + 1)}{2L_w},$$

$$S_d = \frac{S}{L_w}, \quad q_d = \frac{q}{QL_w}, \quad \xi_m = \frac{\pi m}{h_d}, \quad \rho_i = \sqrt{(x_d \cos \theta_i - \alpha)^2 + x_d^2 \sin^2 \theta_i}, \quad \theta_i = \frac{2\pi i}{N},$$

$r_c$  — радиус горизонтальной скважины;  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости;  $\beta = \sqrt{k_h/k_v}$  — параметр анизотропии;  $k_v, k_h$  — коэффициенты вертикальной и горизонтальной проницаемости пласта;  $K_0(z)$  — модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка.

Система интегральных уравнений (1), (2) решается численно. Для этого ствол горизонтальной скважины разбивается на  $n$  сегментов и полагается, что  $q_d(x_d) = q_i$ ,  $x_d \in [x_{i-1}, x_i]$ ,  $S_d = x_0 < x_1 < \dots < x_n = 1 + S_d$ . В результате получаем систему линейных алгебраических уравнений для определения безразмерного давления и притока жидкости к сегментам горизонтальной скважины

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1n} & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & \dots & A_{nn} & 1 \\ \Delta x_1 & \dots & \Delta x_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \\ p_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $A_{ij} = - \int_{x_{j-1}}^{x_j} F(x'_i, \alpha) d\alpha$ ;  $x'_i = \frac{x_{i-1} + x_i}{2}$ ;  $\Delta x_j = x_{j+1} - x_j$ .

Безразмерный коэффициент продуктивности  $J_d$  обратно пропорционален безразмерному давлению  $p_d$  и в общем случае зависит от геометрических параметров лучевой системы горизонтальных скважин и пласта, а также от параметра анизотропии  $\beta$ .

Помимо фильтрационных сопротивлений пласта на продуктивность горизонтальных скважин могут оказывать влияние внутренние сопротивления, возникающие в результате потерь давления на трение при движении жидкости по стволам скважин [3, 8, 9]. Поэтому далее рассматривается задача о стационарном притоке жидкости к лучевой системе горизонтальных скважин с учетом гидравлических потерь давления.

Гидравлические потери давления в горизонтальной скважине определяются уравнениями сохранения массы и импульса в трубах с проницаемыми стенками [2, 8]

$$\frac{dq_w(x)}{dx} = q; \quad (4)$$

$$-\frac{dp(x)}{dx} = \frac{\rho\lambda}{\pi r_c^5} q_w^2(x) + \frac{2\rho q}{\pi^2 r_c^4} q_w(x), \quad (5)$$

где  $q_w(x) = \int_x^{S+L_w} q(\alpha) d\alpha$  — расход жидкости в сечении ствола скважины;  $\rho$  — плотность жидкости.

В случае ламинарного режима течения в стволе скважины коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  вычисляется на основе эмпирической зависимости [8]

$$\lambda = \lambda_0(1 + 0,043\,04 \operatorname{Re}_w^{0,6142}),$$

где  $\lambda_0 = 64/\operatorname{Re}$  — коэффициент гидравлического сопротивления для трубы;  $\operatorname{Re} = 2\rho q_w/(\pi\mu r_c)$  — число Рейнольдса для трубы;  $\operatorname{Re}_w = \rho q/(\pi\mu)$  — число Рейнольдса для пористой среды.

При турбулентном режиме течения в стволе скважины коэффициент гидравлического сопротивления вычисляется с помощью эмпирической зависимости [8]

$$\lambda = \lambda_t(1 - 0,0153 \operatorname{Re}_w^{0,3978}).$$

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda_t$  для трубы при турбулентном режиме течения жидкости определяется из соотношения Колбрука — Уайта [8]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_t}} = -2 \lg \left( \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda_t}} + \frac{\varepsilon_d}{3,71} \right)$$

( $\varepsilon_d$  — относительная шероховатость стенки трубы).

Для того чтобы определить распределения давления и притока жидкости по стволам горизонтальных скважин, нужно решить систему нелинейных уравнений (1), (2), (4), (5) итерационным методом. На начальном этапе полагается, что давление равномерно распределено по стволам горизонтальных скважин и из решения системы линейных алгебраических уравнений (3) находится распределение притока жидкости по стволу горизонтальной скважины. Далее на каждом шаге итерационного процесса из численного решения системы уравнений (4), (5) определяются расход жидкости и перепад давления в сегментах ствола скважины. Полученное выражение для перепада давления приводится к безразмерному виду и суммируется с правой частью системы уравнений (3) для пересчета притока жидкости по стволу скважины. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока распределения давления и притока по стволу горизонтальной скважины не установятся.

**Верификация полуаналитического решения.** При  $N = 2$ ,  $\beta = 1$ ,  $S = 0$  система уравнений (1), (2) описывает установившийся приток жидкости к одиночной горизонтальной скважине с длиной ствола  $2L_w$  в изотропном пласте с круговым контуром питания. В этом случае система линейных алгебраических уравнений (3) сводится к формулам Пилатовского для определения притока жидкости к “ломаной” скважине, состоящей из  $n$  прямолинейных звеньев [1].

Представим выражение для безразмерного коэффициента продуктивности горизонтальной скважины в виде

$$J_d = \frac{1}{\ln(R_k/r_c) + C},$$

где  $C$  — геометрический скин-фактор. В таблице приведены значения геометрического скин-фактора горизонтальной скважины, полученные с помощью метода электрогидродинамической аналогии (ЭГДА) Щуровым [1], а также на основе полуаналитического решения (1), (2) и инженерных формул Борисова [1], Джоши [2] для пласта толщиной  $h = 7,5$  м, радиуса скважины  $r_c = 0,1$  м и различных длин ствола.

Из таблицы следует, что результаты, полученные с использованием предложенного полуаналитического решения, хорошо согласуются с данными эксперимента на основе электролитического моделирования. Результаты, полученные по формуле Борисова [1], лучше согласуются с экспериментальными данными, чем результаты, полученные по формуле Джоши [2]. К аналогичному заключению пришли авторы работы [10] при сравнении

Расчетные и экспериментальные значения геометрического скин-фактора горизонтальной скважины

$2L_w$ , м	$C$			
	Эксперимент с использованием метода ЭГДА [1]	Полуаналитическое решение (1), (2)	Расчет по формуле Борисова [1]	Расчет по формуле Джоши [2]
25	-3,35	-3,348	-3,391	-3,048
50	-4,38	-4,411	-4,456	-4,285
75	-4,95	-4,942	-4,986	-4,871
100	-5,30	-5,294	-5,335	-5,250
125	-5,56	-5,558	-5,596	-5,527

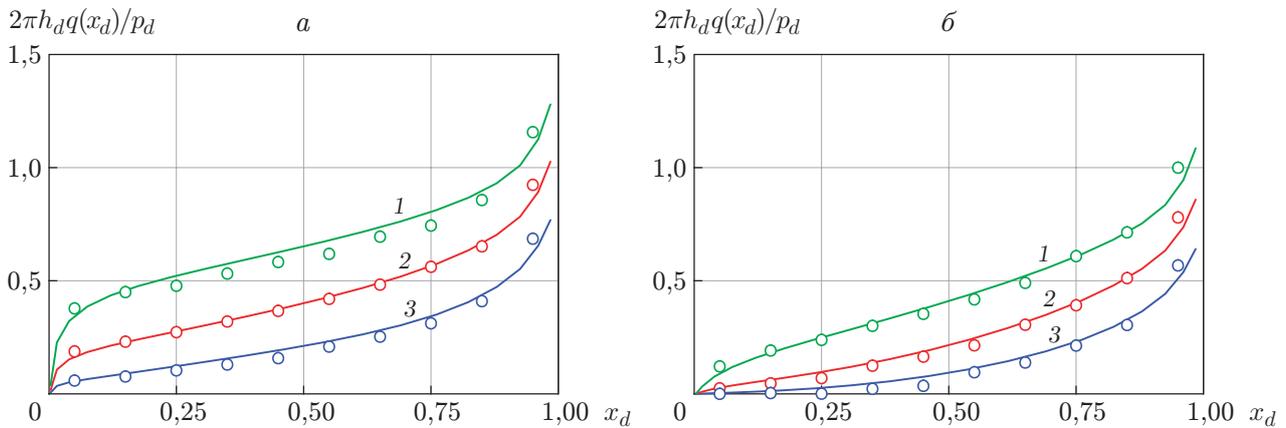


Рис. 2. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) распределения притока жидкости вдоль стволов четырех- (а) и восьмилучевой (б) систем горизонтальных скважин при  $L_w = 50$  м,  $r_c = 0,25$  м,  $R_k = 100$  м и различных значениях толщины пласта:  
 1 —  $h = 40$  м, 2 —  $h = 20$  м, 3 —  $h = 10$  м

данных эксперимента на основе электролитического моделирования притока жидкости к горизонтальной скважине с результатами, полученными по формулам Борисова и Джоши.

В работе [6] с использованием метода ЭГДА на пространственных моделях четырех- и восьмилучевых водозаборов проведены экспериментальные исследования влияния мощности водоносного пласта, длины, радиуса и количества лучей водозабора на интенсивность притока воды по длине лучей. Эксперименты проводились в электролитической ванне размерами в плане  $1,5 \times 1,5$  м, глубиной 0,3 м. Водоносный слой моделировался с помощью раствора медного купороса в дистиллированной воде, круговая граница водоносного слоя — медной пластиной. Вследствие симметричного расположения лучевых скважин в водозаборе проводилось моделирование притока к одному лучу с учетом взаимовлияния всех лучей водозабора. Модель луча изготавливалась из 10 отрезков медной трубки, которые нанизывались на нейлоновую нить. Между отрезками луча помещались прокладки из не проводящего электрический ток материала. С использованием аналогии между жидкостью, фильтрующей в пористой среде и подчиняющейся закону Дарси, и электрическим током в электропроводной среде, подчиняющимся закону Ома, проведены замеры интенсивности притока жидкости к соответствующим участкам луча и суммарного притока ко всему лучу.

На рис. 2 приведены распределения притока жидкости по длине стволов четырех- и восьмилучевых систем горизонтальных скважин, полученные с помощью предложенного метода, и данные экспериментальных исследований с использованием метода ЭГДА [6]. На рис. 3 приведены расчетные (полученные с использованием предложенного метода) и экспериментальные [6] зависимости безразмерного дебита четырех- и восьмилучевых систем горизонтальных скважин от длины стволов.

На рис. 3,а также представлены зависимости, рассчитанные по формуле Борисова [1], обобщенной на случай произвольного распределения горизонтальных стволов по толщине анизотропного пласта:

$$p_d = \ln(\chi r_{ed}) - \frac{h_d}{N} \ln\left(\frac{2\pi r_{cd}}{h_d} \sin \frac{\pi \delta_d}{h_d}\right)$$

( $\chi = 4,00; 2,00; 1,84; 1,78$  для числа стволов  $N = 1, 2, 3, 4$  соответственно).

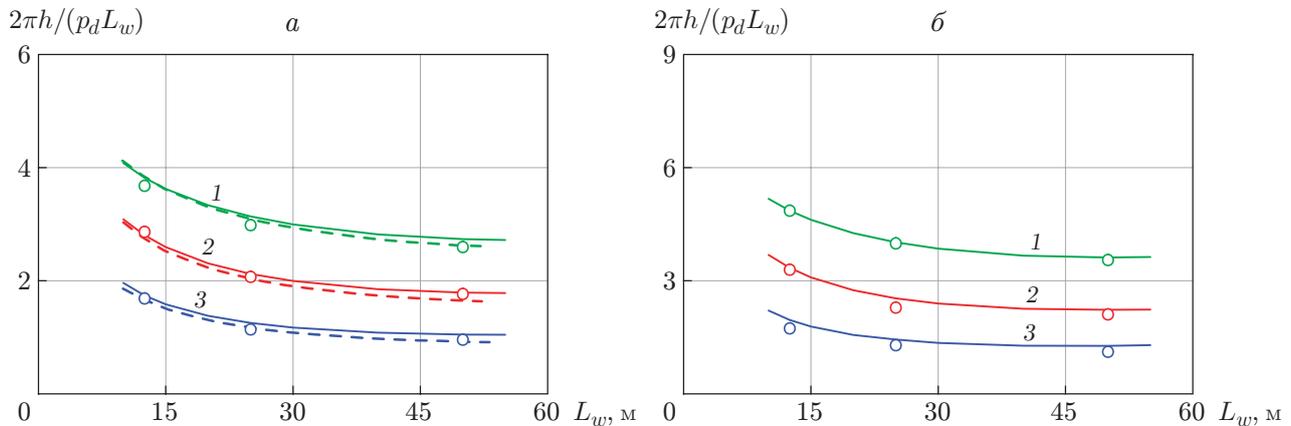


Рис. 3. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) зависимости безразмерного дебита четырех- (а) и восьмилучевой (б) систем горизонтальных скважин от длины стволов при  $r_c = 0,25$  м,  $R_k = 100$  м и различных значениях толщины пласта:

1 —  $h = 40$  м, 2 —  $h = 20$  м, 3 —  $h = 10$  м; сплошные линии — расчет с использованием предложенного метода, штриховые — расчет по формуле Борисова [1]

Положим  $h_d \ll 1$ , тогда  $K_0(\rho_i \xi_m) \approx 0$ , и сумма  $\sum_{m=1}^{\infty} K_0(\rho_i \xi_m) \cos \xi_m \delta_d \cos \xi_m (\delta_d + r_{cd})$

в подынтегральном выражении (1) становится пренебрежимо малой. В этом случае система интегральных уравнений (1), (2) описывает плоский приток жидкости к  $N$  звездообразно расположенным вертикальным трещинам. Точное решение данной задачи имеет вид [11, 12]

$$p_d = \frac{2}{N} \operatorname{arch} \left( \frac{r_{ed}^N - S_d^N}{(S_d + 1)^N - S_d^N} \right)^{1/2};$$

$$q(\alpha) = \frac{\alpha^{N-1}}{\pi \sqrt{((S_d + 1)^N - \alpha^N)(\alpha^N - S_d^N)}}. \quad (6)$$

Анализ решения системы уравнений (1), (2) и зависимости (6) показывает, что распределение притока жидкости по длине горизонтальных скважин и трещин неравномерное, причем приток неограниченно увеличивается к концам горизонтальных скважин (трещин), т. е. имеет место “концевой” эффект.

Используя метод фильтрационных сопротивлений, предложенный в [1], можно получить следующую приближенную формулу для определения продуктивности лучевой системы горизонтальных скважин [12]:

$$p_d = \frac{2}{N} \operatorname{arch} \left( \frac{r_{ed}^N - S_d^N}{(S_d + 1)^N - S_d^N} \right)^{1/2} - \frac{h_d}{N} \ln \left( \frac{2\pi r_{cd}}{h_d} \sin \frac{\pi \delta_d}{h_d} \right). \quad (7)$$

При  $S = 0$ ,  $\delta = 0,5h$ ,  $\beta = 1$  формула (7) сводится к формуле для расчета дебита многозабойной горизонтальной скважины в изотропном пласте [13], при  $S = 0$ ,  $\delta = 0,5h$  и  $N = 2$  — к формуле Ренарда — Дупая для расчета дебита одиночной горизонтальной скважины в анизотропном пласте [2].

С учетом того что  $R_k \gg L_w + S$ , формула (7) принимает вид

$$p_d = \frac{1}{N} \ln \left( 4 \frac{r_{ed}^N - S_d^N}{(S_d + 1)^N - S_d^N} \right) - \frac{h_d}{N} \ln \left( \frac{2\pi r_{cd}}{h_d} \sin \frac{\pi \delta_d}{h_d} \right). \quad (8)$$

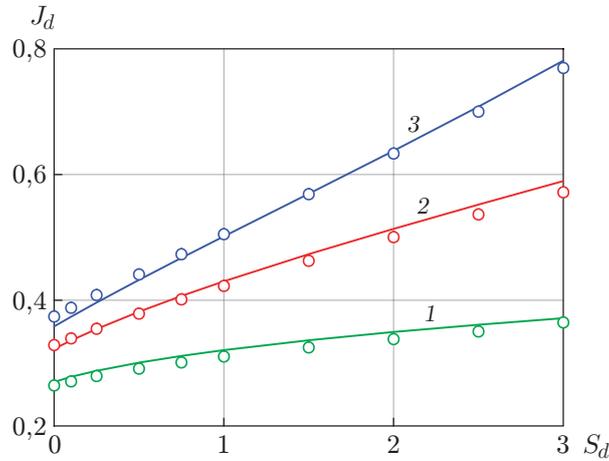


Рис. 4. Зависимость безразмерной продуктивности лучевой системы горизонтальных скважин от величины  $S_d$  при различном количестве стволов: 1 —  $N = 2$ , 2 —  $N = 4$ , 3 —  $N = 8$ ; линии — расчет на основе полуаналитического решения (1), (2), точки — расчет по формуле (8)

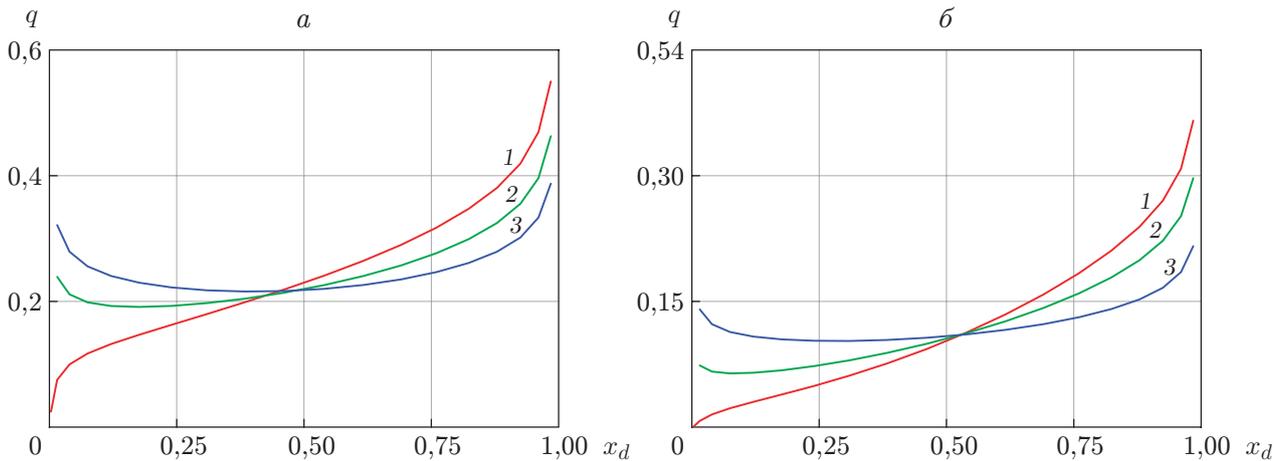


Рис. 5. Распределение притока жидкости вдоль стволов четырех- (а) и восьмилучевой (б) систем горизонтальных скважин при различных значениях  $S_d$ : 1 —  $S_d = 0$ , 2 —  $S_d = 1$ , 3 —  $S_d = 3$

На рис. 4 показаны зависимости безразмерной продуктивности двух-, четырех- и восьмилучевых систем горизонтальных скважин от величины  $S_d$ , полученные из решения системы уравнений (1), (2) при следующих параметрах:  $L_w = 100$  м,  $r_c = 0,1$  м,  $h = 40$  м,  $\delta = 20$  м,  $R_k = 1000$  м,  $k_h = 0,1$  мкм<sup>2</sup>,  $k_v = 0,1$  мкм<sup>2</sup>,  $\mu = 20$  мПа·с. Точками на рис. 4 показаны значения продуктивности радиальной системы горизонтальных скважин, рассчитанные по формуле (8).

Распределение притока жидкости по стволам четырех- и восьмилучевой систем горизонтальных скважин при различных значениях  $S_d$  представлено на рис. 5. С увеличением расстояния  $S_d$  взаимовлияние стволов уменьшается и как следствие увеличивается приток жидкости к начальным участкам стволов горизонтальных скважин.

На рис. 6 представлены распределения притока и давления по стволу одиночной горизонтальной скважины с учетом и без учета потерь давления на трение, полученные при

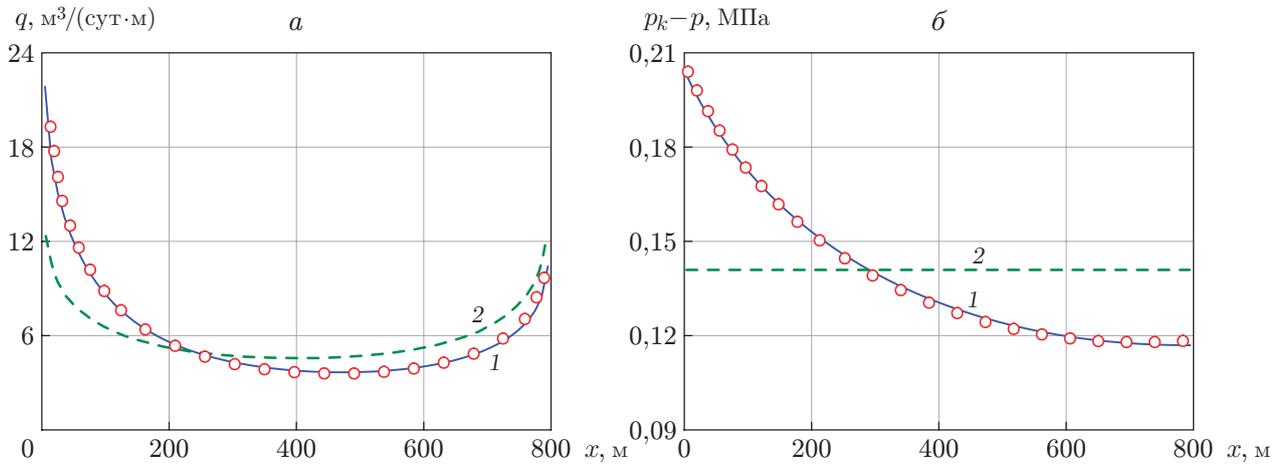


Рис. 6. Распределения притока (а) и давления (б) по длине одиночной горизонтальной скважины с учетом (1) и без учета (2) гидравлических потерь давления: линии — расчет на основе полуаналитического решения (1), (2), точки — расчет [9]

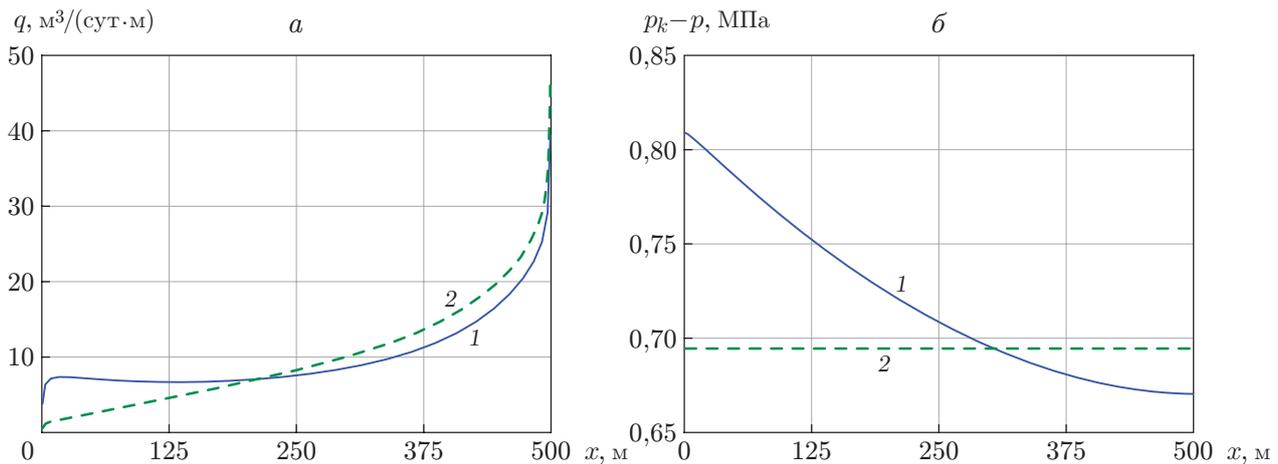


Рис. 7. Распределения притока (а) и давления (б) по длине стволов четырехлучевой системы горизонтальных скважин с учетом (1) и без учета (2) гидравлических потерь давления

следующих значениях параметров [9]:  $L_w = 800,1$  м,  $r_c = 0,1$  м,  $h = 21,9$  м,  $R_k = 846$  м,  $p_k = 15,85$  МПа,  $k_h = 8,5$  мкм<sup>2</sup>,  $k_v = 1,5$  мкм<sup>2</sup>,  $\mu = 1,43$  мПа·с,  $Q = 4767$  м<sup>3</sup>/сут,  $\rho = 881$  кг/м<sup>3</sup>,  $\varepsilon_d = 10^{-4}$ . На рис. 6 видно, что распределения притока и давления по стволу горизонтальной скважины, полученные с использованием полуаналитического метода, хорошо согласуются с результатами расчетов [9].

На рис. 7 приведены распределения притока и давления по стволам четырехлучевой системы горизонтальных скважин с учетом и без учета потерь давления на трение, полученные при следующих значениях параметров:  $L_w = 500$  м,  $r_c = 0,075$  м,  $h = 20$  м,  $\delta = 10$  м,  $S = 0$ ,  $R_k = 2000$  м,  $k_h = 5$  мкм<sup>2</sup>,  $k_v = 1$  мкм<sup>2</sup>,  $\mu = 1$  мПа·с,  $\varepsilon_d = 3 \cdot 10^{-4}$ ,  $Q = 20\,000$  м<sup>3</sup>/сут,  $\rho = 981$  кг/м<sup>3</sup>. При достаточно больших значениях длины и дебита горизонтальных скважин перепад давления в стволе сопоставим с депрессией в пласте. Поэтому при расчете продуктивности высокодебитных лучевых систем горизонтальных скважин необходимо учитывать гидравлические потери давления на трение.

**Заключение.** В работе получено полуаналитическое решение задачи об установившемся притоке жидкости к лучевой системе горизонтальных скважин в анизотропном пласте с круговым контуром питания. Проведена верификация полученного решения с экспериментальными данными на основе электролитического моделирования и результатами расчетов по инженерным формулам. Показано, что на характер распределения притока жидкости по длине стволов горизонтальных скважин помимо интерференции стволов существенное влияние могут оказывать гидравлические потери давления на трение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Борисов Ю. П.** Разработка нефтяных месторождений горизонтальными и многозабойными скважинами / Ю. П. Борисов, В. П. Пилатовский, В. П. Табаков. М.: Недра, 1964.
2. **Joshi S. D.** Horizontal well technology. Tulsa: Pennwell Publ. Co., 1991.
3. **Анатольевский П. А.** Горизонтальные водозаборные скважины / П. А. Анатольевский, Г. А. Разумов. М.: Недра, 1970.
4. **Разумов Г. А.** Горизонтальные скважины конечной длины в напорном пласте ограниченной мощности // ПМТФ. 1961. № 5. С. 128–135.
5. **Raghavan R., Joshi S. D.** Productivity of multiple drainholes or fractured horizontal wells // SPE Form. Evaluat. 1993. V. 8, N 1. P. 11–16.
6. **Насберг М. В.** Исследование фильтрации в лучевой водозабор с учетом неравномерной интенсивности притока воды по длине лучей и их взаимовлияния: Дис. ... канд. техн. наук. Тбилиси, 1982.
7. **Морозов П. Е.** Моделирование притока жидкости к лучевой системе горизонтальных скважин в анизотропном пласте // Сб. докл. 9-го Всерос. съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 20–24 авг. 2015 г. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. С. 2638–2640.
8. **Ouyang L.-B., Arbabi S., Aziz K.** A single-phase wellbore-flow model for horizontal, vertical, and slanted wells // SPE J. 1998. V. 3, N 2. P. 124–133.
9. **Ozkan E., Sarica C., Hacı M.** Influence of pressure drop along the wellbore on horizontal-well productivity // SPE J. 1999. V. 4, N 3. P. 288–301.
10. **Suprunowicz R., Butler R. M., Ford C. O. K., Kry S. F.** An experimental investigation of convergent flow to horizontal wells // J. Canad. Petroleum Technol. 1998. V. 37, N 10. P. 51–57.
11. **Дворецкий П. И.** Электромагнитные и гидродинамические методы при освоении нефтегазовых месторождений / П. И. Дворецкий, И. Г. Ярмахов. М.: Недра, 1998.
12. **Qi C. W.** Complex analysis of the permeation fluid field excited by cracks arranged in a ring structure // Inner Mongolia Petrochem. Industry. 2009. V. 35, N 21. P. 39–40.
13. **Бердин Т. Г.** Проектирование разработки нефтегазовых месторождений системами горизонтальных скважин. М.: Недра-Бизнес-центр, 2001.

*Поступила в редакцию 20/VI 2016 г.,  
в окончательном варианте — 10/III 2017 г.*