

## 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОМЕРНОГО ПРЯМОЛИНЕЙНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ

Реальные продуктивные пласты нефтяных и газовых месторождений имеют неоднородное строение по фильтрационным параметрам пластов, в частности неоднородность по проницаемости. Различают *слоистую неоднородность* (по толщине пласта – сложен пропластками различной проницаемости) и *зональную неоднородность* (по площади, по простирацию пласта, неоднородный пласт с закономерным изменением в каком-либо направлении и др.)

В данной практической работе изучаются особенности фильтрации в слоисто-неоднородном полосообразном пласте, состоящем из двух пропластков с различной проницаемостью (рис 5.1, а) и зонально-неоднородном полосообразном пласте, состоящем из двух зон с различной проницаемостью (рис 5.1, б).

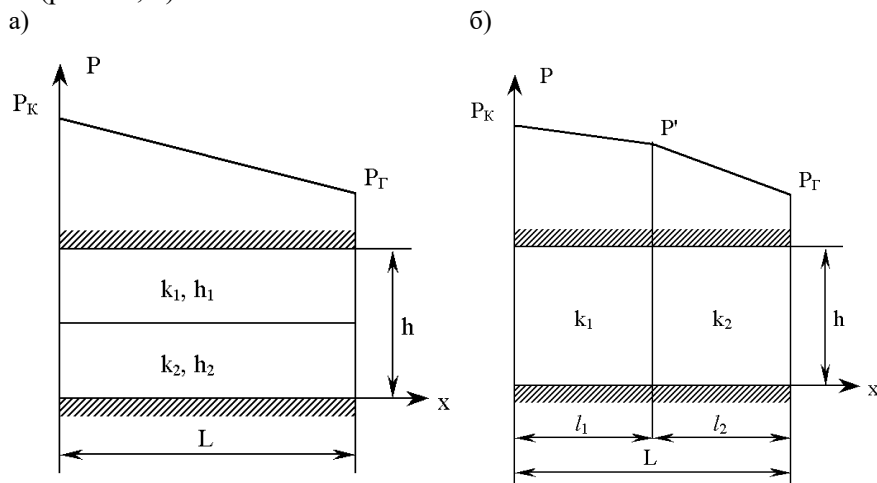


Рис. 5.1. Прямолинейно-параллельный поток в слоисто-неоднородном (а) и зонально-неоднородном (б) пластах

Рассмотрим особенности фильтрации в слоисто- и зонально-неоднородных полосообразных пластах.

### 1. Случай слоисто-неоднородного пласта

При стационарной одномерной прямолинейно-параллельной фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси в слоисто-неоднородном пласте, состоящем из 2-х пропластков с различной проницаемостью  $K_1$  и  $K_2$  (рис 5.1, а), распределение давления в каждом из пропластков линейное и определяется выражением

$$P = P_K - \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} \cdot x, \quad (5.1)$$

где  $P_K$  – контурное давление, Па;  $P_\Gamma$  – давление на галерее, Па;  $L_K$  – длина пласта, м;

Градиенты давления в каждом пропластке постоянны и равны между собой, поскольку

$$\text{grad}P = -\frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} = \text{const}, \quad (5.2)$$

т.е.  $\text{grad} P_1 = \text{grad} P_2$ .

Скорости фильтрации по пропласткам:

$$V_1 = -\frac{K_1}{\mu} \text{grad}P_1 = \frac{K_1}{\mu} \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K}, \quad (5.3)$$

$$V_2 = -\frac{K_2}{\mu} \text{grad}P_2 = \frac{K_2}{\mu} \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K}, \quad (5.4)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с.

При равенстве градиентов давления в каждом пропластке из уравнений (5.3)-(5.4) следует справедливость следующего соотношения

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{K_1}{K_2}, \quad (5.5)$$

т.е. для слоисто-неоднородного пласта скорости фильтрации по пропласткам прямо пропорциональны проницаемостям.

Различие скоростей фильтрации  $V$  по пропласткам крайне нежелательно. Стремятся к тому, чтобы нефть двигалась в пропластках с одинаковой скоростью. Для этого регулируют продвижение фронта нагнетания воды.

Объемные расходы жидкости по пропласткам  $Q_1$  и  $Q_2$  и общий объемный расход полосообразной залежи  $Q$  можно определить как

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= V_1 \cdot F_1 = \frac{K_1}{\mu} \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} B h_1 \\ Q_2 &= V_2 \cdot F_2 = \frac{K_2}{\mu} \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} B h_2 \end{aligned} \right\} Q = Q_1 + Q_2 = \frac{B(P_K - P_\Gamma)}{\mu L_K} (K_1 h_1 + K_2 h_2), \quad (5.6)$$

(\*)

где  $B$  – ширина полосообразной залежи, м;  $h_1$  и  $h_2$  – толщина первого и второго пропластков, м.

Если выразить  $Q$  галереи через  $K_{CP}$ , то можно записать

$$Q = \frac{K_{CP}}{\mu} \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} B (h_1 + h_2), \quad (5.7)$$

Приравнявая (5.6) и (5.7), после преобразований получим

$$K_{CP} \cdot (h_1 + h_2) = K_1 h_1 + K_2 h_2, \quad (5.8)$$

тогда средняя проницаемость полосообразной залежи  $K_{CP}$

$$K_{CP} = \frac{K_1 h_1 + K_2 h_2}{h_1 + h_2} \quad (5.9)$$

или в общем случае

$$K_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad (5.10)$$

где  $n$  – количество пропластков;  $h_i$  – толщина  $i$ -го пропластка с проницаемостью  $K_i$ .

## 2. Случай зонально-неоднородного пласта

При стационарной одномерной прямолинейно-параллельной фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси в зонально-неоднородном пласте, состоящем из 2-х однородных зон с различной проницаемостью  $K_1$  и  $K_2$  (рис. 5.1, б), распределение давления в каждом из пропластков линейное, но определяется следующими выражениями:

$$P_1(x) = P_K - \frac{P_K - P'}{l_1} \cdot x \quad 0 \leq x \leq l_1, \quad (5.11)$$

$$P_2(x) = P' - \frac{P' - P_\Gamma}{l_2} \cdot x \quad 0 \leq x \leq l_2, \quad (5.12)$$

где  $P'$  – давления на границе 1 и 2 зон;  $l_1$  и  $l_2$  – протяженности 1 и 2 зон, м.

Градиенты давления в каждой зоне постоянны, но не равны между собой, поскольку:

$$\text{grad}P_1 = -\frac{P_K - P'}{l_1} \quad (5.13)$$

$$\text{grad}P_2 = -\frac{P' - P_\Gamma}{l_2}. \quad (5.14)$$

Скорости фильтрации по пропласткам:

$$V_1 = -\frac{K_1}{\mu} \text{grad}P_1 = \frac{K_1}{\mu} \frac{P_K - P'}{l_1} \quad (5.15)$$

$$V_2 = -\frac{K_2}{\mu} \text{grad}P_2 = \frac{K_2}{\mu} \frac{P' - P_\Gamma}{l_2}. \quad (5.16)$$

Из уравнения неразрывности фильтрационного потока следует, что объемные расходы по зонам и по всей полосообразной залежи одинаковы, т.е.  $Q = V_1 F_1 = V_2 F_2$ . Это означает, что  $V_1 = V_2$ , т.к.  $F_1 = F_2 = Bh$ .

При равенстве скоростей фильтрации в каждой зоне полосообразной залежи из уравнений (5.15-5.16) следует справедливость следующего соотношения:

$$\frac{\text{grad}P_1}{\text{grad}P_2} = \frac{K_2}{K_1}, \quad (5.17)$$

т.е. градиенты давления обратно пропорциональны коэффициентам проницаемости зон пласта.

Из условия неразрывности потока следует, что объемные расходы жидкости по зонам  $Q_1$  и  $Q_2$  и общий объемный расход полосообразной залежи  $Q$  равны:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \frac{K_1}{\mu} \frac{(P_K - P')}{l_1} Bh \\ Q_2 &= \frac{K_2}{\mu} \frac{(P' - P_\Gamma)}{l_2} Bh \end{aligned} \right\} Q = Q_1 = Q_2 \quad (5.18)$$

Из системы уравнений (5.18) можно определить неизвестное давление на границе двух зон  $P'$ :

$$P' = \frac{k_1 l_2 P_K + k_2 l_1 P_\Gamma}{k_1 l_2 + k_2 l_1}. \quad (5.19)$$

Подставим полученное выражение для  $P'$  в любое уравнение системы (5.18) и выразим объемные расходы  $Q_1$  и  $Q_2$ . Из условия неразрывности потока они равны общему объемному расходу  $Q$ , который можно выразить через  $K_{cp}$

$$Q = \frac{K_{cp}}{\mu} \frac{P_K - P_\Gamma}{L} B \cdot h. \quad (5.20)$$

Отсюда можно получить выражение для определения  $K_{cp}$ :

$$K_{cp} = \frac{L}{\frac{l_1}{K_1} + \frac{l_2}{K_2}} \quad (5.21)$$

или в общем случае

$$K_{cp} = \frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{k_i}} \quad (5.22)$$

где  $n$  – количество зон;  $x_i$  – протяженность  $i$ -й зоны с проницаемостью  $K_i$ .

### Порядок выполнения работы

Выполнение практической работы осуществляется в соответствии с индивидуальным вариантом задания, устанавливаемым преподавателем. Варианты заданий приведены в табл. 5.1.

1. При изучении характеристик рассматриваемых (слоисто- и зонально-неоднородного) фильтрационных потоков несжимаемой жидкости получить формулы и изобразить графически распределения давления, градиента давления и скорости фильтрации по длине полосообразной залежи (в соответствии с формулами (5.2-5.4)).

2. Для слоисто-неоднородного пласта убедиться в правильности соотношения (5.5). Для зонально-неоднородного пласта показать справедливость соотношения (5.17).

3. Для слоисто-неоднородного полосообразного пласта определить объемные расходы по пропласткам (5.6) и по всему пласту в целом (5.7). Выразить объемные расходы в  $\text{м}^3/\text{с}$  и  $\text{м}^3/\text{сут}$ . Определить средний коэффициент проницаемости для слоисто-неоднородного пласта (5.9).

4. Для зонально-неоднородного полосообразного пласта определить давление на границе зон  $P'$  (5.19), объемные расходы по зонам (5.18) и по всему пласту в целом (5.20). Выразить объемные

расходы в м<sup>3</sup>/с и м<sup>3</sup>/сут. Определить средний коэффициент проницаемости для зонально-неоднородного пласта (5.21).

5. Провести анализ и оценку полученных результатов, сделать необходимые пояснения и выводы. В выводах сформулировать полученные результаты с акцентом на выполнение задач практической работы.

Таблица 5.1

Исходные данные для расчетов

Номер варианта	Р <sub>к</sub> , МПа	Р <sub>г</sub> , МПа	L <sub>к</sub> , км	В, м	μ, МПа·с	К <sub>1</sub> , мкм <sup>2</sup>	К <sub>2</sub> , мкм <sup>2</sup>	Слоисто- неоднородный		Зонально-	
								h <sub>1</sub> , м	h <sub>2</sub> , м	l <sub>1</sub> , км	l <sub>2</sub> , км
1	10,0	7,5	10,0	100	1,0	1,0	0,5	5	5	5,0	5,0
2	9,8	7,3	9,5	120	1,5	0,9	0,4	4	5	5,0	4,5
3	9,6	7,1	9,0	140	2,0	0,8	0,3	5	4	4,5	4,5
4	9,4	6,9	8,5	160	2,5	0,7	0,2	4	4	4,5	4,0
5	9,2	6,7	8,0	180	3,0	0,6	0,5	4	3	4,0	4,0
6	9,0	6,5	7,5	200	3,5	0,5	0,6	3	4	4,0	3,5
7	8,8	6,3	7,0	180	4,0	0,4	0,7	3	3	3,5	3,5
8	8,6	6,1	6,5	160	4,5	0,3	0,8	4	3	3,5	3,0
9	8,4	5,9	6,0	140	5,0	0,2	0,9	3	4	3,0	3,0
10	8,2	5,7	5,5	120	5,5	0,1	1,0	4	4	3,0	2,5
11	8,5	6,0	6,0	100	5,0	0,5	1,0	4	5	3,0	3,0
12	8,7	6,2	6,5	150	4,5	0,4	0,9	5	4	3,5	3,0
13	8,9	6,4	7,0	200	4,0	0,3	0,8	5	5	3,5	3,5
14	9,1	6,6	7,5	180	3,5	0,2	0,7	4	5	4,0	3,5
15	9,3	6,8	8,0	160	3,0	0,5	0,6	5	4	4,0	4,0
16	9,5	7,0	8,5	140	2,5	0,6	0,5	4	4	4,5	4,0
17	9,7	7,2	9,0	120	2,0	0,7	0,4	4	3	4,5	4,5
18	9,9	7,4	9,5	100	1,5	0,8	0,3	3	4	5,0	4,5
19	10,0	7,5	10,0	120	1,0	0,9	0,2	3	3	5,0	5,0
20	9,8	7,3	10,0	140	2,0	1,0	0,1	4	3	5,0	5,0
21	9,6	7,1	9,5	160	3,0	1,0	1,5	3	4	4,5	5,0
22	9,4	6,9	9,0	180	4,0	0,9	1,4	4	4	4,5	4,5
23	9,2	6,7	8,5	200	5,0	0,8	1,3	4	5	4,0	4,5
24	9,0	6,5	8,0	150	6,0	0,7	1,2	5	4	4,0	4,0
25	8,8	6,3	7,5	100	7,0	0,6	1,1	5	5	3,5	4,0
26	8,6	6,1	7,0	120	8,0	0,5	1,0	6	5	3,5	3,5
27	8,4	5,9	6,5	140	9,0	0,4	0,9	5	6	3,0	3,5
28	8,2	5,7	6,0	160	8,0	0,3	1,8	6	6	3,0	3,0
29	8,5	6,0	5,5	180	7,0	0,2	0,7	6	8	2,5	3,0
30	8,7	6,2	6,0	200	6,0	0,1	0,6	8	6	3,0	3,0