

Раздел II Установившиеся движения несжимаемой жидкости по закону Дарси

Тема 2.1 Математическое описание фильтрационного потока

План лекции

1. Вывод уравнения неразрывности потока.
2. Дифференциальное уравнение движения.
3. Уравнение состояния пористой среды и флюида.

Краткое содержание лекции

Для описания процессов в пористой среде, заключающей в себе движущийся флюид (жидкость, газ) выделяется бесконечно малый объем флюида и рассматривается изменение массы, энергии и т. д., происходящие в нем за бесконечно малый промежуток времени.

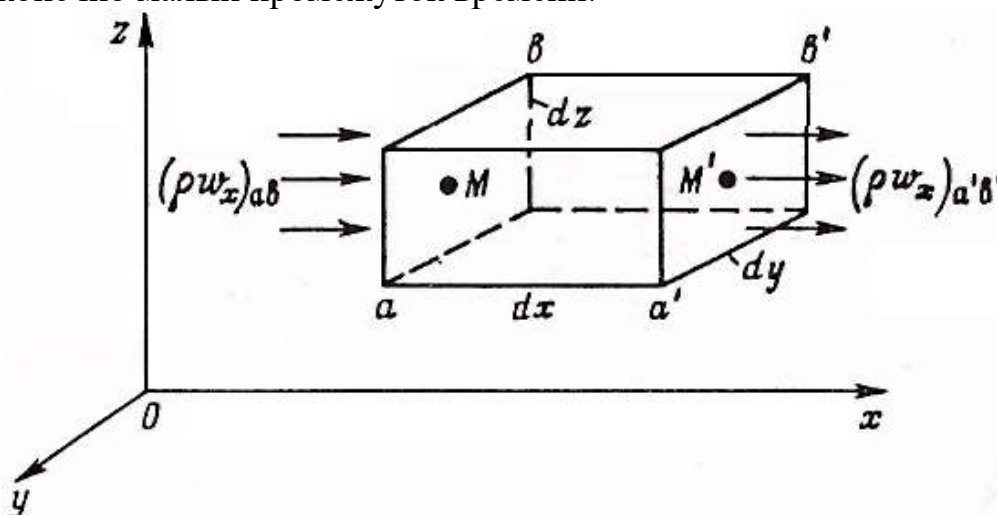


Рисунок 2.1 – Схема элемента пласта для вывода уравнения неразрывности

В результате интегрирования определяется, прежде всего, распределение давления и скорости фильтрации по всему пласту в любой момент времени

$$p = f(x, y, z, t) \quad (2.1)$$

$$W_y = f(x, y, z, t) \quad (2.2)$$

$$W_x = f(x, y, z, t) \quad (2.3)$$

$$W_z = f(x, y, z, t) \quad (2.4)$$

При фильтрации сжимаемого флюида в деформированной среде необходимо, кроме указанных величин, определять плотность, вязкость, пористость, проницаемость как функции координат и времени.

Рассматривая движение элементарной массы флюида через элементарный объем и массу флюида, находящегося в этом объеме, и приравнявая их, получают уравнение неразрывности в виде

$$\frac{\partial(\rho W_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho W_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W_z)}{\partial z} = \text{div}(\rho W), \quad (2.5)$$

где $\text{div}(\rho \bar{W})$ - дивергенция массовой скорости фильтрации,
 ρ - плотность флюида.

Уравнение описывает изменение массы за элементарный промежуток времени.

Дифференциальные уравнения движения

$$W_x = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (2.6)$$

$$W_y = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y}; \quad (2.7)$$

$$W_z = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (2.8)$$

Знак (-) означает, что давление уменьшается в направлении движения жидкости.

Зависимость плотности флюида от давления представляет собой уравнение состояния.

Коэффициент сжимаемости флюида:

$$\beta = \frac{1}{V_{ж}} \frac{dV_{ж}}{dP} \quad (2.9)$$

Переходя от объемов к плотности и интегрируя от начальных значений ρ_0 и p_0 до текущих ρ и p имеем

$$\rho = \rho_0 [1 + \beta(p - p_0)] \quad (2.10)$$

Для идеального газа уравнение состояния:

$$\rho = \frac{\rho_{атм} P}{P_{атм}}, \quad (2.11)$$

где p – поровое давление.

Для реального газа
$$\frac{P}{\rho} = zRT, \quad (2.12)$$

z – степень отклонения состояния реального газа от идеального.

Эксперименты показывают, что вязкость нефти и газа увеличивается с повышением давления

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-a_\mu(p_0 - p)} \quad (2.13)$$

При малых изменениях давления

$$\mu = \mu_0 [1 - a_\mu(p_0 - p)], \quad (2.14)$$

где a_μ - коэффициент состава нефти или газа

Изменение пористости при повышении давления

$$m = m_0 \cdot e^{-a_m(p_0 - p)} \quad (2.15)$$

Изменение проницаемости при малых изменениях давления

$$K = K_0 [1 - a_k(p_0 - p)] \quad (2.16)$$

при больших

$$K = K_0 \cdot e^{-a_k(p_0 - p)}$$

(2.17)

Контрольные вопросы для СРС

1. Сформулировать уравнение неразрывности (сплошности).
2. Дифференциальные уравнения движения при линейном законе фильтрации Дарси.
3. Зависимость параметров флюидов (плотности, вязкости) от давления.
4. Зависимость пористости и проницаемости от давления.

Тема 2.2 Одномерные фильтрационные потоки несжимаемой жидкости в однородных пластах

План лекции

1. Уравнение установившейся фильтрации несжимаемой жидкости.
2. Потенциал скорости фильтрации.
3. Одномерные фильтрационные потоки в однородных средах.

Краткое содержание лекции

При недеформируемой пористой среде ($\rho = \text{const}$, $m = \text{const}$) уравнение неразрывности (сплошности) принимает вид

$$\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} = 0 \quad (2.18)$$

Подставляя значение производных скорости фильтрации в уравнение

$$\frac{\partial W_x}{\partial x} = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial W_y}{\partial y} = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial W_z}{\partial z} = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}. \quad (2.19)$$

неразрывности, имеем

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0.$$

(2.20)

Уравнение является дифференциальным уравнением установившейся фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси в недеформируемой пористой среде и носит название уравнения Лапласа в декартовой системе координат.

В теории фильтрации для проведения практических расчетов является удобным введение функции $\Phi(x, y, z)$, называемую потенциалом скорости фильтрации и определяемую как

$$\Phi = \frac{k}{\mu} (p + \rho g z) \quad (2.21)$$

и подставить её в уравнение движения, то получим

$$W_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad W_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad W_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (2.22)$$

т.е. потенциалом скорости фильтрации называется функция $\Phi(x, y, z)$, производная которой с обратным знаком вдоль линии тока равна скорости фильтрации $W(x, y, z)$.

Поток жидкости или газа считается одномерным, если параметры тока являются функциями одной координаты по линии тока.

К одномерным потокам относятся:

- прямолинейно-параллельный,
- плоскорадиальный,
- радиально-сферический.

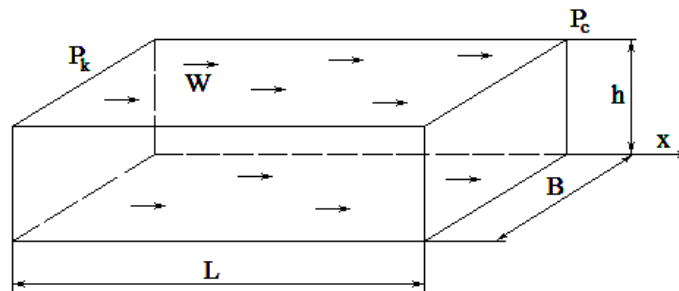


Рисунок 2.2 – Одномерный прямолинейно-параллельный фильтрационный поток

Если векторы скоростей фильтрации параллельны между собой, то имеет место прямолинейно-параллельный поток. Дебит, скорость фильтрации и давление в любом сечении потока

$$Q = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_c}{l} S; \quad W = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_c}{l}; \quad p = p_k - \frac{P_k - P_c}{l} \cdot x \quad (2.23)$$

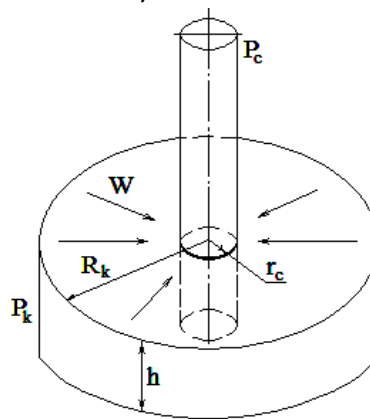


Рисунок 2.3 – Одномерный плоскорадиальный фильтрационный поток

При плоскорадиальном потоке векторы скорости фильтрации направлены по радиусам к оси скважины и дебит, скорость фильтрации и давление равны $Q = \frac{2\pi kh}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_c}{\ln \frac{R_k}{r_c}}; \quad W = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_c}{\ln \frac{R_k}{r_c}} \cdot \frac{1}{r}; \quad p = p_k - \frac{P_k - P_c}{\ln \frac{R_k}{r_c}} \cdot \ln \frac{R_k}{r}, (2.24)$

где R_k – радиус контура питания;

r_c – радиус скважины.

Отношение $K = \frac{Q}{\Delta P}$ называется коэффициентом продуктивности.

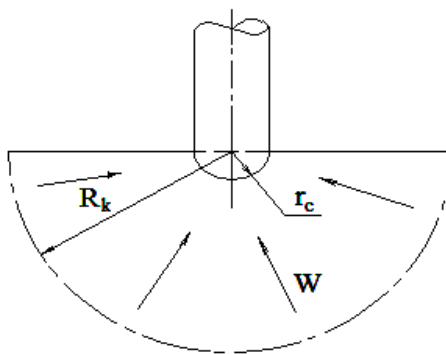


Рисунок 2.4 – Одномерный радиально-сферический фильтрационный поток

Фильтрационный поток называется радиально-сферическим, если векторы скоростей фильтрации направлены в пространстве по прямым радиально сходящимся в одной точке. Ввиду центральной симметрии характеристики потока зависят от одной координаты $r(r_c, R_k)$.

$$Q = 2\pi \cdot k \cdot r_c \cdot \frac{P_k - P_c}{\mu}; \quad W = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_c}{\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_k}} \cdot \frac{1}{r^2}; \quad p = p_k - \frac{P_k - P_c}{\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_k}} \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_k} \right). \quad (2.25)$$

Контрольные вопросы для СРС

1. Сформулировать дифференциальное уравнение установившейся фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси.
2. Описать потенциал скорости фильтрации.
3. Какие существуют одномерные фильтрационные потоки?
4. Как определяются характеристики плоскорадиального потока и зависимость скорости фильтрации и градиента давления от расстояния до скважины?

Тема 2.3 Фильтрационные течения несжимаемой жидкости в неоднородных пластах

План лекции

1. Виды неоднородности пластов.
2. Обобщение расчетных формул на случай неоднородности пластов.

Краткое содержание лекции

В пластах-коллекторах нефти и газа выделяют следующие основные виды неоднородности:

- слоистая неоднородность (рисунок 2.5а);
- зональная неоднородность (рисунок 2.5б).

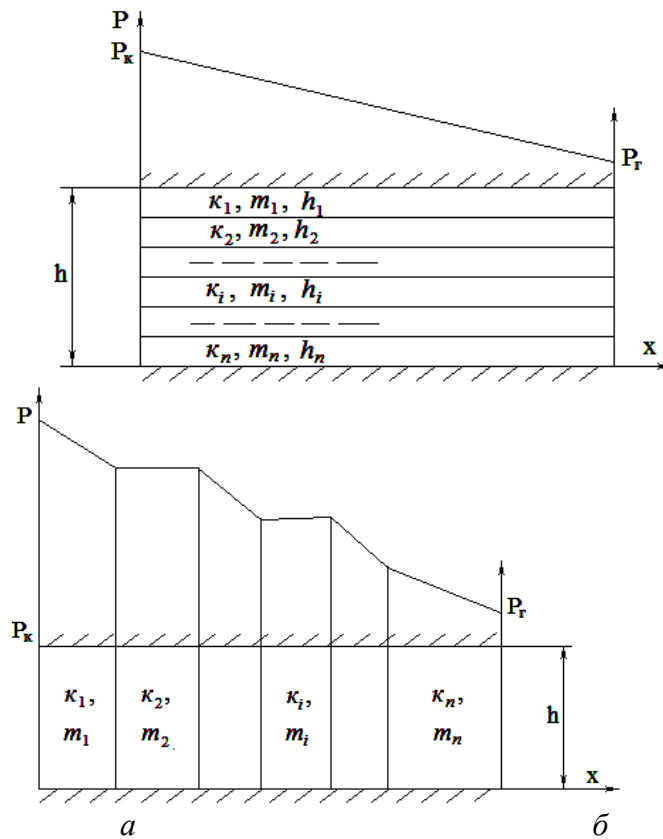


Рисунок 2.5 – Виды неоднородности пласта

В слоисто-неоднородном пласте при отсутствии перетоков будет иметь место прямолинейно-параллельный фильтрационный поток и для расчета характеристик используются формулы одномерного потока:

распределение давления
$$p = p_k - \frac{P_k - P_c}{l} \cdot x, \quad (2.26)$$

дебит потока
$$Q = B \cdot \frac{P_k - P_c}{\mu \cdot l} \sum_{i=1}^n k_i \cdot h_i, \quad (2.27)$$

средний коэффициент проницаемости
$$K_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}. \quad (2.28)$$

При плоско-радиальном движении в слоисто-неоднородном пласте давление в каждом пропластке меняется по логарифмическому закону

$$p = p_k - \frac{P_k - P_c}{\ln \frac{R_k}{r_c}} \cdot \ln \frac{R_k}{r} \quad (2.28)$$

Дебит скважины определяется как сумма дебитов в отдельных пропластках

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = 2 \cdot \pi \cdot \frac{P_k - P_c}{\mu \cdot \ln \frac{R_k}{r_c}} \sum_{i=1}^n k_i \cdot h_i. \quad (2.29)$$

Пласт состоит из нескольких зон различной проницаемости. На границе зон проницаемость меняется скачкообразно; в пределах одной зоны проницаемость в среднем одинакова.

При прямолинейно-параллельной фильтрации жидкости в таком пласте по закону Дарси дебит потока подсчитывается по формуле:

$$Q = \frac{B \cdot h \cdot (P_k - P_c)}{\mu \cdot \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{K_i}}. \quad (2.30)$$

Средний коэффициент проницаемости

$$K_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{K_i}}, \quad (2.31)$$

Распределение давления в каждой зоне $p_i(*) = p_{i-1} - \frac{P_{i-1} - P_i}{l_i}.$

(2.32)

При плоско-радиальном притоке жидкости к скважине зоны различной проницаемости имеют кольцеобразную форму. Дебит скважины

$$Q = \frac{2\pi \cdot h \cdot (P_k - P_c)}{\mu \cdot \sum_{i=1}^r \frac{1}{K_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}. \quad (2.33)$$

Распределение давления в каждой зоне подчиняется логарифмическому закону

$$p_i(r) = p_i - \frac{P_i - P_{i-1}}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \cdot \ln \frac{r_i}{r}. \quad (2.34)$$

При непрерывном изменении проницаемости от зоны к зоне дебит скважины определяется по формуле:

$$Q = \frac{2\pi \cdot h \cdot (P_k - P_c) (K_c \cdot R_k - K_0 \cdot r_c)}{\mu \cdot (R_k - r_c) \left(\ln \frac{R_k}{r_c} + \ln \frac{K_c}{K_0} \right)}, \quad (2.35)$$

где K_0 – коэффициент проницаемости на контуре питания.

Контрольные вопросы для СРС

1. Основные виды неоднородности в пластах-коллекторах нефти и газа.
2. Охарактеризовать плоскорадиальный поток в слоисто-неоднородном пласте.
3. Охарактеризовать прямолинейно-параллельный поток в зонально-неоднородном пласте.
4. Распределение давления, градиента давления и скорости фильтрации в слоисто-неоднородном пласте при плоскорадиальном потоке.

Тема 2.4 Установившаяся плоская фильтрация жидкости

План лекции

1. Потенциалы точечных стоков и источников.
2. Принцип суперпозиции.
3. Метод отображения источников и токов.

Краткое содержание лекции

Явление интерференции (взаимодействия) скважин заключается в том, что при пуске, остановке или изменении режима одной группы скважин изменяются дебиты и забойные давления другой группы скважин, работающих на том же пласте.

Точечным стоком называется точка, поглощающая жидкость. Сток можно рассматривать как гидродинамически совершенную эксплуатационную скважину. Точечный источник – это точка, выделяющая жидкость (модель нагнетательной скважины).

Для плоскорадиальной фильтрации при работе в бесконечном пласте одной скважины–стока скорость фильтрации

$$W = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_c}{\ln \frac{R_k}{r_c}} \cdot \frac{1}{r} = \frac{Q}{2\pi hr} = \frac{q}{2\pi}, \quad (2.36)$$

где $q = \frac{Q}{h}$ - дебит скважины-стока на единицу мощности пласта.

Если выразить W через его потенциал $W = -\frac{d\Phi}{dS} = \frac{d\Phi}{dr}$, откуда после интегрирования потенциал точечного стока на плоскости $\Phi = \frac{q}{2\pi} \cdot \ln r + C$.
(2.37)

Для точечного источника дебит $q < 0$.

При совместной работе в пласте нескольких скважин результирующий потенциал в любой точке M пласта равен алгебраической сумме потенциалов $\Phi_1, \Phi_2, \dots$, обусловленных работой каждой отдельной скважины

$$\Phi = \frac{q_1}{2\pi} \cdot \ln r_1 + \frac{q_2}{2\pi} \cdot \ln r_2 + \dots + C = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n q_i \ln r_i + C \quad (2.38)$$

Скорости фильтрации при этом складываются геометрически, физически это означает, что фильтрационные потоки от работы каждого источника или стока накладываются друг на друга. В этом и заключается принцип сложения течений или принцип суперпозиции.

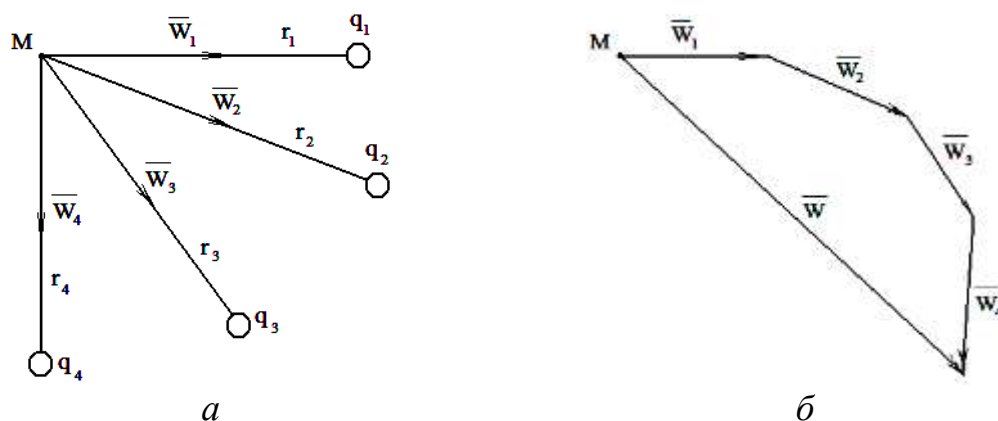


Рисунок 2.6 – Схема скоростей фильтрации в точке М при работе источников и стоков на неограниченной плоскости (а) и результирующий вектор скорости фильтрации в точке М (б)

Используя принцип суперпозиций можно приближенно рассчитывать дебиты для группы скважин с весьма удаленным контуром питания. Помещая мысленно точку М последовательно на забой каждой скважины, где $\Phi_M = \Phi_{Ci}$, получают систему уравнений:

$$\Phi_k - \Phi_{C_1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(q_1 \ln \frac{R_k}{r_{C_1}} + q_2 \cdot \ln \frac{R_k}{r_{1_2}} + \dots + q_n \ln \frac{R_k}{r_{1_n}} \right) \quad (2.39)$$

$$\Phi_k - \Phi_{C_n} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(q_1 \ln \frac{R_k}{r_{1_n}} + q_2 \cdot \ln \frac{R_k}{r_{2_n}} + \dots + q_n \ln \frac{R_k}{r_{C_n}} \right). \quad (2.40)$$

Принцип суперпозиции можно использовать, если скважины работают в пласте, ограниченном контуром питания той или иной формы, но при этом, на границах вводятся фиктивные скважины за пределами пласта, которые создают с реальными скважинами граничные условия. Этот метод называется методом отображения источников и стоков.

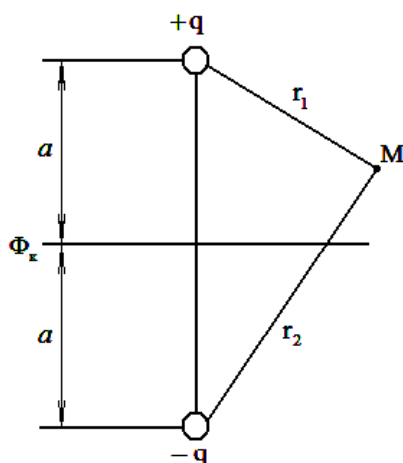


Рисунок 2.7

Так, например, если эксплуатационная скважина находится в пласте с прямолинейным контуром питания на расстоянии «а» от контура, то её надо зеркально отобразить с дугой стороны контура, и считать её дебит отрицательным. При этом, потенциал в любой точке М равен

$$\Phi_M = \frac{q}{2\pi} \cdot \ln r_1 - \frac{q}{2\pi} \cdot \ln r_2 + C = \frac{q}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_2} + C, \quad (2.41)$$

на контуре питания $r_1=r_2$ и $\Phi = C = \Phi_k$, а дебит скважины

$$Q = \frac{2\pi \cdot h \cdot (\Phi_k - \Phi_c)}{\ln \frac{2a}{r_c}} = \frac{2\pi \cdot k \cdot h \cdot (p_k - p_c)}{\mu \cdot \ln \frac{2a}{r_c}}. \quad (2.42)$$

Контрольные вопросы для СРС

1. Дать определение явлению интерференции скважин.
2. Дать определение точечному источнику и точечному стоку.
3. Как определяются потенциалы точечных соков и точечных источников?
4. Сформулировать отображение стоков и источников.
5. Что такое метод суперпозиции?

Тема 2.5 Интерференция скважин

План лекции

1. Приток жидкости к группе скважин бесконечной цепочки и к скважинам кольцевой батареи.
2. Метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений.

Краткое содержание лекции

Дебит каждой скважины бесконечной цепочки, расположенной на определенном расстоянии от прямолинейного контура питания выражается

формулой

$$q = \frac{Q}{h} = \frac{2\pi k h (p_k - p_c)}{\mu (\ln 2sh \frac{\pi L}{\sigma} + \ln \frac{\sigma}{\pi r_c})}, \quad (2.43)$$

где σ - половина расстояния между скважинами.

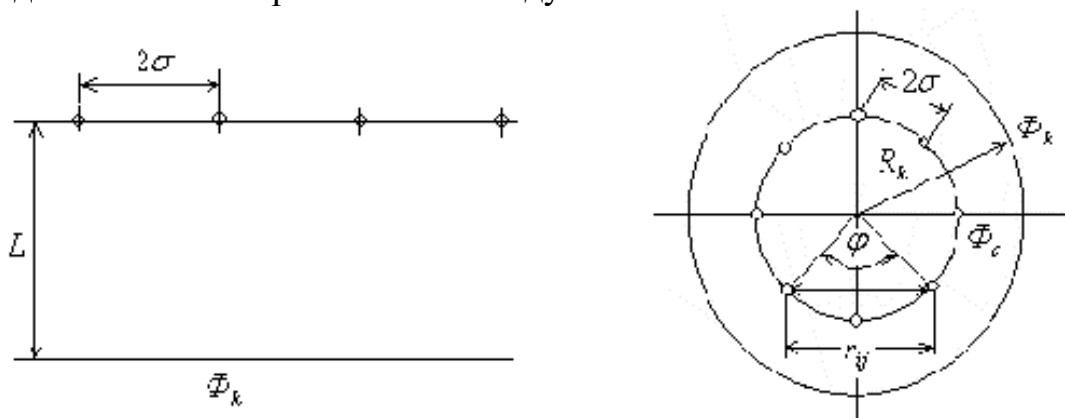


Рисунок 2.8 – Скважина бесконечной цепочки, расположенная на определенном расстоянии от контура

$$\operatorname{sh} \frac{\pi L}{\sigma} = \frac{1}{2} (e^{\frac{\pi L}{\sigma}} - e^{-\frac{\pi L}{\sigma}}) - \text{гиперболический синус} \quad (2.44)$$

В случае, когда $L > \sigma$, величина $e^{-\frac{\pi L}{\sigma}}$ очень мала и тогда

$$\ln 2 \operatorname{sh} \frac{\pi L}{\sigma} \simeq \ln e^{\frac{\pi L}{\sigma}} = \frac{\pi L}{\sigma} \quad (2.45)$$

и дебит скважины для n скважин

$$q = \frac{2\pi(\Phi_{\kappa} - \Phi_c) \cdot n}{\frac{\pi L}{\sigma} + \ln \frac{\sigma}{\pi r_c}} = \frac{2\pi\kappa(p_{\kappa} - p_c) \cdot n}{\mu(\frac{\pi L}{\sigma} + \ln \frac{\sigma}{\pi r_c})} = \frac{(p_{\kappa} - p_c)}{\frac{\mu L}{\kappa \cdot h \cdot 2\sigma\pi} + \frac{\mu}{2\pi\kappa n} \ln \frac{\sigma}{\pi r_c}} \quad (2.46)$$

Дебит одной скважины кольцевой батареи, состоящей из n скважин в круговом пласте радиусом R_{κ}

$$q = \frac{Q}{h} = \frac{2\pi(\Phi_{\kappa} - \Phi_c)}{\ln \left[\frac{R_{\kappa}^n}{nr_c \cdot R_1^{n-1}} (1 - \frac{R_1^{2n}}{R_{\kappa}^{2n}}) \right]} = \frac{2\pi\kappa(p_{\kappa} - p_c)}{\mu \ln \left[\frac{R_{\kappa}^n}{nr_c \cdot R_1^{n-1}} (1 - \frac{R_1^{2n}}{R_2^{2n}}) \right]}, \quad (2.47)$$

где R_1 - радиус батареи.

Одним из методов расчета дебитов многорядных батарей или цепочек скважин является метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений Ю.П.Борисова.

Суммарный объемный дебит цепочек из n скважин

$$Q = \frac{(p_{\kappa} - p_c)}{\frac{\mu L}{\kappa \cdot h \cdot 2 \cdot \sigma \cdot \pi} + \frac{\mu}{h \cdot 2\pi \cdot \kappa \cdot n} \ln \frac{\sigma}{\pi \cdot r_c}} \quad (2.48)$$

Используя электрическую аналогию $I = \frac{U}{R}$ и принимая аналогом силы тока объемный расход, аналогом разности потенциалов – разность давлений, то аналогом внешних и внутренних сопротивлений можно принять выражение суммы в знаменателе.

Формула примет вид: $Q = \frac{p_{\kappa} - p_c}{\rho + \rho'}$ (2.49)

Электрическая схема представляет два последовательно соединенных проводника с сопротивлением ρ и ρ' с разностью потенциалов $p_{\kappa} - p_c$ и силой тока Q (см. рисунок 10)

Если в пласте имеется 3 цепочки с числом скважин n_1, n_2, n_3 , с радиусами $r_{c_1}, r_{c_2}, r_{c_3}$; давлениями $p_{c_1}, p_{c_2}, p_{c_3}$ и суммарными дебитами Q_1, Q_2, Q_3 , то схема сопротивлений будет разветвленной, т.к. количество жидкости от контура питания разделяется: дебит Q_1 перехватывается I-й цепочкой, затем дебит Q_2 перехватывается II-й цепочкой и т.д. (см. рисунок 2.9)

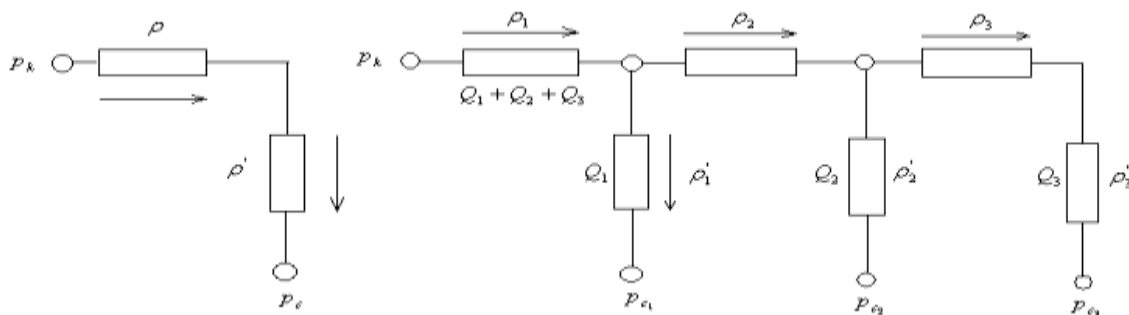


Рисунок 2.9 – Схема сопротивления 3-х цепочек

Расчет схемы проводится по законам Ома и Кирхгофа составлением алгебраических линейных уравнений по числу неизвестных (дебитов Q_1, Q_2, Q_3 , или давлений p_{c1}, p_{c2}, p_{c3}).

Контрольные вопросы для СРС

1. Дебит скважины бесконечной цепочки расположенной на расстоянии от контура питания.
2. Дебит скважины кольцевой батареи.
3. Принцип построения эквивалентных фильтрационных сопротивлений Ю.П. Борисова для расчета дебитов многорядных батарей.

Тема 2.6 Приток жидкости к гидравлически несовершенной скважине

План лекции

1. Гидравлически совершенные и несовершенные скважины.
2. Виды несовершенства скважины.
3. Дебит гидравлически несовершенной скважины.
4. Определение фильтрационных сопротивлений C_1 и C_2 .

Краткое содержание лекции

Скважина называется гидравлически совершенной, если она вскрывает пласт на всю мощность и забой скважины открытый, т.е. вся поверхность забоя является фильтрующей. Фильтрация при этом – плоская.

Если скважина с открытым забоем вскрывает пласт не на всю мощность или скважина сообщается с пластом через отдельные отверстия, то фильтрация жидкости (газа) будет пространственной, а скважина – гидродинамически несовершенной.

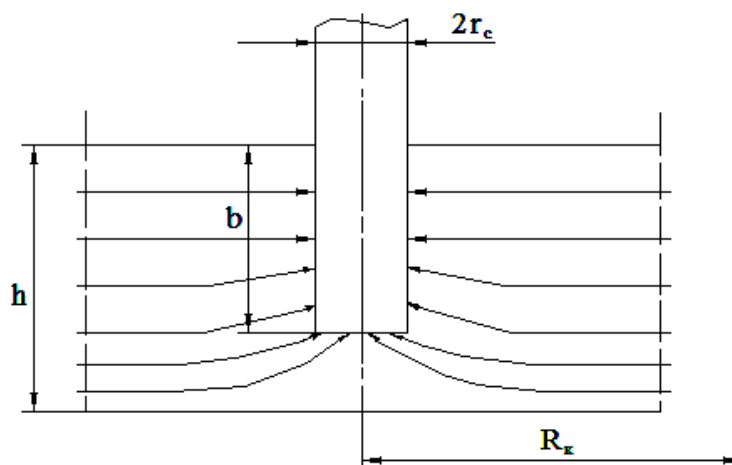


Рисунок 2.10 – Линии тока к несовершенной скважине

Различают 3 вида несовершенства скважины:

1) по степени вскрытия пласта:

– скважина с открытым забоем вскрывшей пласт не на всю мощность;

2) по характеру вскрытия:

– скважина сообщается с пластом через отверстия в обсадной колонне.

3) по степени и по характеру вскрытия одновременно.

1. Дебит скважины несовершенной по степени вскрытия в пласте конечной толщины h определяется по формуле М. Маскета:

$$Q = \frac{\pi \cdot \kappa \cdot h (p_{\kappa} - p_c)}{\mu \left[2 \ln \frac{4h}{r_c} - \varphi(\bar{h}) \right] - \ln \frac{4h}{R_{\kappa}}} \quad (2.50)$$

где $\varphi(\bar{h})$ - некоторая функция относительного вскрытия пласта $\bar{h} = b/h$,

которая определяется $\varphi(\bar{h}) = \ln \frac{\Gamma(0,875\bar{h}) \cdot \Gamma(0,125\bar{h})}{\Gamma(1-0,875\bar{h}) \cdot \Gamma(1-0,125\bar{h})}$,

(2.51)

где Γ – интеграл Эйлера второго рода или гамма-функция, определяемая по таблицам.

2. Дебит скважины несовершенной по степени и по характеру вскрытия

$$Q = \frac{2\pi \cdot \kappa \cdot h (p_{\kappa} - p_c)}{\mu \left(\ln \frac{R_{\kappa}}{r_c} + C_1 + C_2 \right)} \quad (2.52)$$

где C_1 и C_2 - дополнительные фильтрационные сопротивления, которые определяются по таблицам В.И.Щунова для различных видов несовершенств.

3. Скважина вскрыла кровлю пласта неограниченной толщины забоем в форме полусферы. Поток – радиально-сферический и дебит равен:

$$Q = \frac{2\pi \cdot \kappa \cdot (p_{\kappa} - p_c)}{\mu \cdot \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_{\kappa}} \right)} \quad (2.53)$$

4. Для скважины глубиной «в» в пласте бесконечной мощности дебит определяется по формуле Н.К.Гириного:

$$Q = \frac{2\pi \cdot \kappa \cdot v}{\mu} \cdot \frac{(p_{\kappa} - p_c)}{\ln \frac{1,6v}{r_c}} \quad (2.54)$$

Из соотношения дебитов совершенной и несовершенной скважины выводится коэффициент совершенства скважины

$$\delta = \frac{Q_{несов}}{Q_{сов}} = \frac{\ln \frac{R_{\kappa}}{r_c}}{\ln \frac{R_{\kappa}}{r_c} + C} \quad (2.55)$$

или

$$C = C_1 + C_2 = \left(\frac{1}{\delta} - 1 \right) \cdot \ln \frac{R_{\kappa}}{r_c} .$$

(2.56)

Рекомендуемая литература

1. Басниев К.С., Власов А.М., Кочина И.Н., Максимов В.М., Подземная гидравлика. Учебник для вузов – М.: Недра, 1986, с. 96 – 101.
2. Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г. Подземная гидравлика. Учебное пособие. М.: Недра, -1972 , с. 207-226.
3. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б., Подземная гидравлика. Учебное пособие для нефтегазовых специальностей университетов. Москва-Ижевск, НИЦ РХД, 2001 с.352-372.

Контрольные вопросы для СРС

1. Определение несовершенства скважин.
2. Дебит скважины несовершенной по степени вскрытия по М.Маскету.
3. Дебит скважины несовершенной по степени и по характеру вскрытия.
4. Что такое коэффициент совершенства скважины?
5. Как определяются дополнительные фильтрационные сопротивления C_1 и C_2 ?