

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СКВАЖИН

## Задача плоской интерференции (наложения) скважин.

- Пласт - неограниченный, горизонтальный, имеет постоянную мощность и непроницаемые подошву и кровлю.
- Пласт вскрыт множеством совершенных скважин и заполнен однородной жидкостью или газом.
- Движение жидкости - установившееся, подчиняется закону Дарси и является плоским.

Плоское движение - течение происходит в плоскостях, параллельных между собой и картина движения во всех плоскостях идентична.

В связи с этим разбирается течение в одной из этих плоскостей - в основной плоскости течения.

# Потенциал скорости фильтрации

В теории фильтрации вводится функция  $\Phi(x,y,z)$ , называемая *потенциалом скорости фильтрации* (для горизонтального пласта)

$$\Phi = \frac{K}{\mu} (P + \rho g z)$$

потенциалом скорости фильтрации называется функция, производная которой с обратным знаком вдоль линии тока равна скорости фильтрации.

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

**Точечным источником** называют точку на плоскости, поглощающую жидкость (модель нагнетательной скважины бесконечно малого радиуса).

**Точечным стоком** называют точку на плоскости, отдающую жидкость (модель добывающей скважины бесконечно малого радиуса).

На плоскости вокруг стока (источника) будет плоскорадиальное движение. Тогда скорость фильтрации запишется в виде

$$W = \frac{Q}{2\pi rh} = \frac{d\Phi}{dr}$$

потенциала для точечного стока на плоскости  
(источник -)

$$\Phi = \frac{Q}{2\pi h} \ln r + C$$

# ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ

№	Вид коллектора	Характеристики	Вид флюида	Характеристики	Потенциал
1	Недеформируемый (пористый) пласт	$k = \text{const}$	Несжимаемая жидкость	$\rho = \text{const}; \mu = \text{const}$	$\varphi = \frac{k\rho}{\mu} p + C$
2	Трещиноватый (деформируемый) пласт	$k = k_m^0 \left[ 1 - \beta^* (p_0 - p) \right]^3$	Несжимаемая жидкость	$\rho = \text{const}; \mu = \text{const}$	$\varphi = \frac{k_m^0 \rho}{4 \mu \beta^*} \left[ 1 - \beta^* (p_0 - p) \right]^4 + C$
3	Недеформируемый (пористый) пласт	$k = \text{const}$	Упругая жидкость $\beta_{ж} = \frac{d\rho}{\rho dp}$	$\mu = \text{const}$ $\rho = \rho_0 e^{\beta_{ж}(p-p_0)}$	$\varphi = \frac{k}{\mu \beta_{ж}} \rho + C$
4	Недеформируемый (пористый) пласт	$k = \text{const}$	Совершенный газ	$\rho = \rho_{ст} p / p_{ст}$ - изотермическое течение; $\mu = \text{const}$	$\varphi = \frac{k \rho_{ст}}{2 \mu p_{ст}} p^2 + C$
5	Недеформируемый (пористый) пласт	$k = \text{const}$	Реальный газ	$p = z\rho R T$ - общий случай; $\mu = \text{const};$ $\rho = \rho_{ст} \frac{p}{p_{ст}} \frac{1}{z(p)}$  - изотермическое течение	$\varphi = \frac{k \rho_{ст}}{p_{ст}} f(p) + C$ $f = \frac{p^2}{2\mu \bar{z}} + C$

№	Вид коллектора	Вид флюида	Потенциал
1	Недеформируемый (пористый) пласт	Несжимаемая жидкость	$\phi \sim r$
2	Трещиноватый (деформируемый) пласт	Несжимаемая жидкость	$\phi \sim r^4$
3	Недеформируемый (пористый) пласт	Упругая жидкость	$\phi \sim r$
4	Недеформируемый (пористый) пласт	Газ	$\phi \sim r^2$
5	Трещиноватый (деформируемый) пласт	Газ	$\phi \sim r^5$

- **Формула Гиринского**

$$Q = \frac{2\pi h(\Phi_{\kappa} - \Phi_c)}{\ln \frac{1.6h}{r_{\kappa}}}$$

- **Формула Маскета**

$$Q = \frac{2\pi h(\Phi_{\kappa} - \Phi_c)}{\frac{1}{2\bar{h}} \left[ 2 \ln \frac{4h}{r_c} - f(\bar{h}) \right] - \ln \frac{4h}{r_{\kappa}}}$$

Течение несжимаемой жидкости через недеформируемый (пористый) пласт  
/плоско-радиальное течение/

$$\varphi = \frac{k\rho}{\mu} p + C$$

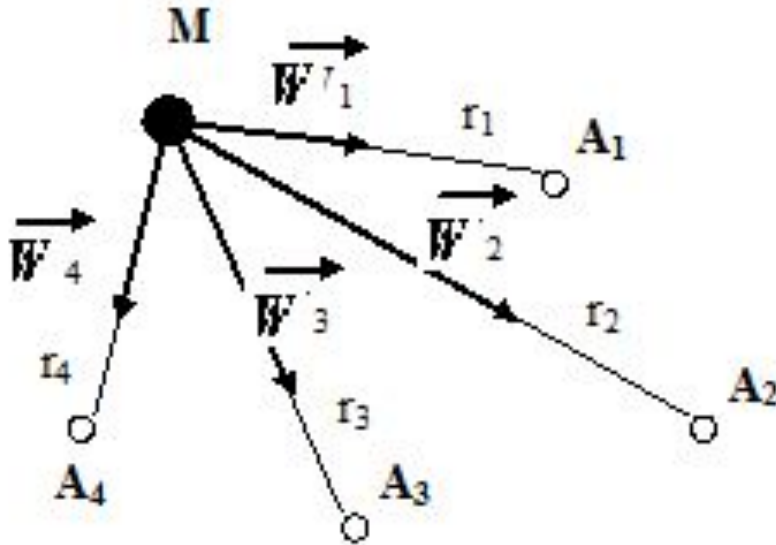


## Метод СУПЕРПОЗИЦИИ

При совместном действии в пласте нескольких стоков (эксплуатационных скважин) или источников (нагнетательных скважин) потенциальная функция, определяемая каждым стоком (источником), вычисляется по формуле для единственного стока (источника).

## Гидродинамический смысл принципа суперпозиции

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



$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = \frac{Q_1}{2\pi h} \ln r_1 + C_1, \\ \Phi_2 = \frac{Q_2}{2\pi h} \ln r_2 + C_2, \\ \dots \\ \Phi_n = \frac{Q_n}{2\pi h} \ln r_n + C_n. \end{array} \right.$$

$$\Phi_M = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n = \frac{1}{2\pi h} \sum_{i=1}^n Q_i \ln r_i + C,$$

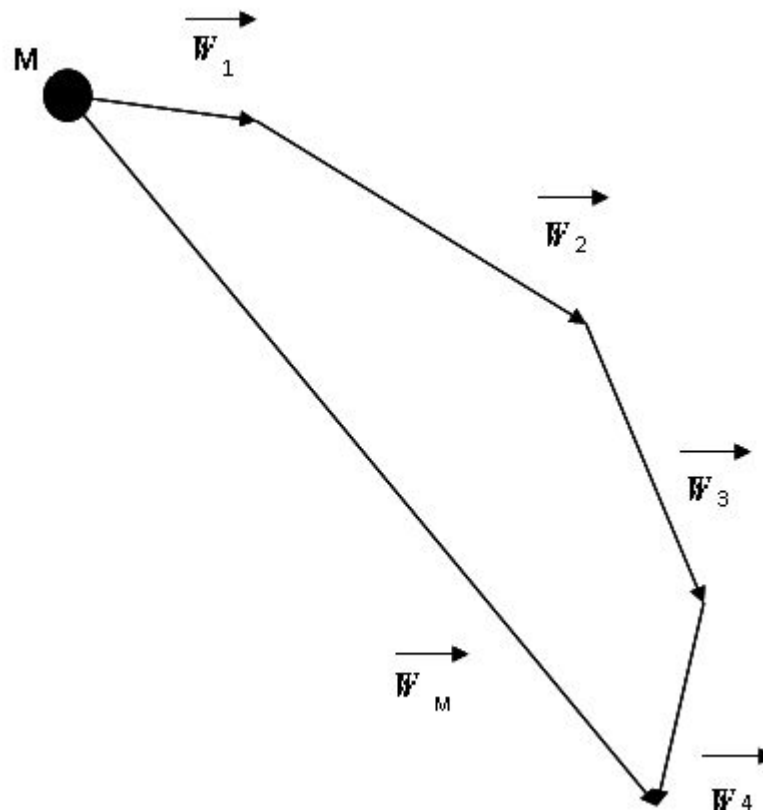
$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

фильтрационные потоки от работы каждого источника или стока накладываются друг на друга

- Скорости фильтрации при этом складываются геометрически.

$$W_1 = \frac{Q_1}{2\pi r_1 h}$$

$$W_4 = \frac{Q_4}{2\pi r_4 h}$$



Используя принцип суперпозиции, можно приближенно рассчитывать дебиты или потенциалы (а значит, забойные давления) для небольших групп скважин.

# Приток жидкости к группе скважин в пласте с удаленным контуром питания

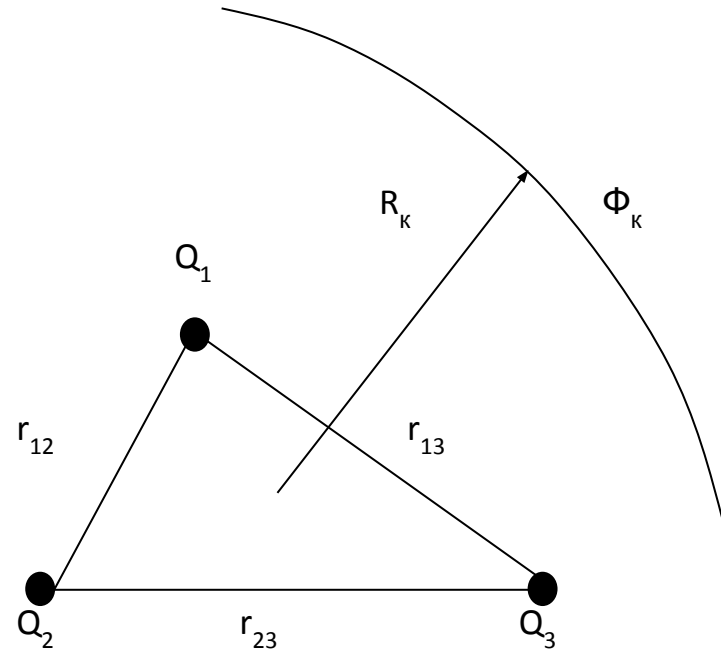
$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_{c1} &= \frac{1}{2\pi h} (Q_1 \ln R_c + Q_2 \ln r_{12} + Q_3 \ln r_{13}) + C, \\ \Phi_{c2} &= \frac{1}{2\pi h} (Q_1 \ln r_{12} + Q_2 \ln R_c + Q_3 \ln r_{23}) + C, \\ \Phi_{c3} &= \frac{1}{2\pi h} (Q_1 \ln r_{13} + Q_2 \ln r_{23} + Q_3 \ln R_c) + C, \end{aligned} \right.$$

$$\Phi_k = \frac{1}{2\pi h} (Q_1 \ln R_k + Q_2 \ln R_k + Q_3 \ln R_k) + C.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_k - \Phi_{c1} &= \frac{1}{2\pi h} \left( Q_1 \ln \frac{R_k}{R_c} + Q_2 \ln \frac{R_k}{r_{12}} + Q_3 \ln \frac{R_k}{r_{13}} \right), \end{aligned} \right.$$

$$\Phi_k - \Phi_{c2} = \frac{1}{2\pi h} \left( Q_1 \ln \frac{R_k}{r_{12}} + Q_2 \ln \frac{R_k}{R_c} + Q_3 \ln \frac{R_k}{r_{23}} \right),$$

$$\Phi_k - \Phi_{c3} = \frac{1}{2\pi h} \left( Q_1 \ln \frac{R_k}{r_{13}} + Q_2 \ln \frac{R_k}{r_{23}} + Q_3 \ln \frac{R_k}{R_c} \right).$$



Принцип суперпозиции можно использовать не только в бесконечных пластах, но и в пластах, имеющих приближенный контур питания той или иной формы, либо непроницаемую границу.

В этом случае вводятся фиктивные скважины-стоки или скважины-источники за пределами пласта и рассматривается их совместная работа с реальными скважинами.

- Это – метод отображения источников-стоков.

# Приток жидкости к скважине в пласте с прямолинейным контуром питания

- Потенциал в любой точке пласта  $M$  равен:

$$\Phi_M = \frac{+Q}{2\pi h} \ln r_1 + \frac{-Q}{2\pi h} \ln r_2 + C = \frac{Q}{2\pi h} \ln \frac{r_1}{r_2} + C.$$

Потенциал на контуре питания

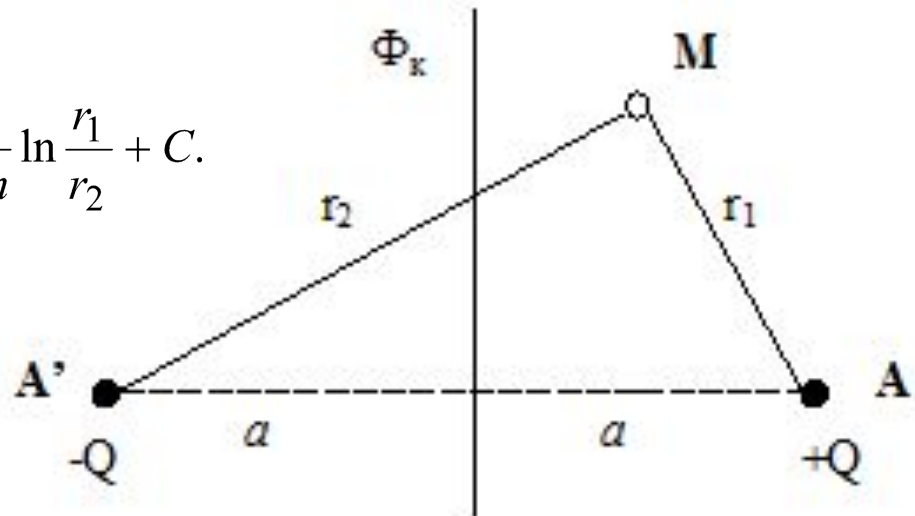
$\Phi_k = C$ , поскольку для точки, помещенной на контур питания,  $r_1 = r_2$ .

Потенциал на забое скважины  $A$

равен:

$$\Phi_c = \frac{+Q}{2\pi h} \ln R_c + \frac{-Q}{2\pi h} \ln 2a + C = \frac{Q}{2\pi h} \ln \frac{R_c}{2a} + \Phi_k = \Phi_k - \frac{Q}{2\pi h} \ln \frac{2a}{R_c}.$$

$$Q = \frac{2\pi h(\Phi_k - \Phi_c)}{\ln \frac{2a}{R_c}} = \frac{2\pi Kh(P_k - P_c)}{\mu \ln \frac{2a}{R_c}}$$



# Приток к скважине в пласте с произвольным контуром питания

1. При вычислении дебита скважины форма внешнего контура пласта не имеет сколько-нибудь существенного значения.

2. Чем дальше от внешнего контура пласта находится скважина, тем меньший дебит она имеет. Однако, так как величина расстояния входит под знаком логарифма, то даже значительное изменение этого расстояния мало влияет на величину дебита

3. В случае расположения скважины эксцентрично относительно контура поток можно считать плоско-радиальным и дебит рассчитывать по формуле Дюпюи если  $r_k \gg 10^3 r_c$  и эксцентриситет  $a_1 < r_k / 2$ .

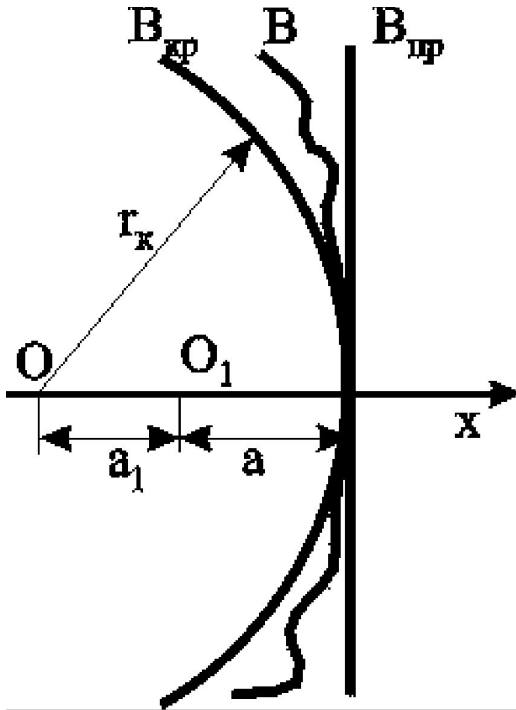


Схема видов контуров питания

# ЭГДА (электрогидродинамическая аналогия)

- 1) изменение **напряжения** между узлами электрической сетки аналогично распределению **давления** в пласте

$$U_1 - U_2 \equiv P_1 - P_2 \quad \text{или} \quad \Delta U \equiv \Delta P$$

- 2) **электрическое сопротивление** участка электрической сетки пропорционально (аналогично) **гидродинамическому сопротивлению** участка моделируемого пласта

$$R_g \equiv \Omega + \omega$$

- 3) **сила тока**, протекающего между узлами сетки, **пропорциональна (аналогична)** количеству жидкости, протекающей через участок моделируемого пласта

$$I \equiv Q'$$



При этом справедлив закон Кирхгофа, согласно которому суммарное падение напряжения в сети равно сумме падений напряжений на отдельных участках:

$$\Delta U = \sum_i^n I \cdot R_{\text{э}}$$

$$\Delta P = \sum_i^n Q'(\Omega + \omega)$$

# Приток к прямолинейной батарее скважин

Режим: удаленный контур питания и постоянные забойные давления

Состав по числу скважин : четный и нечетный

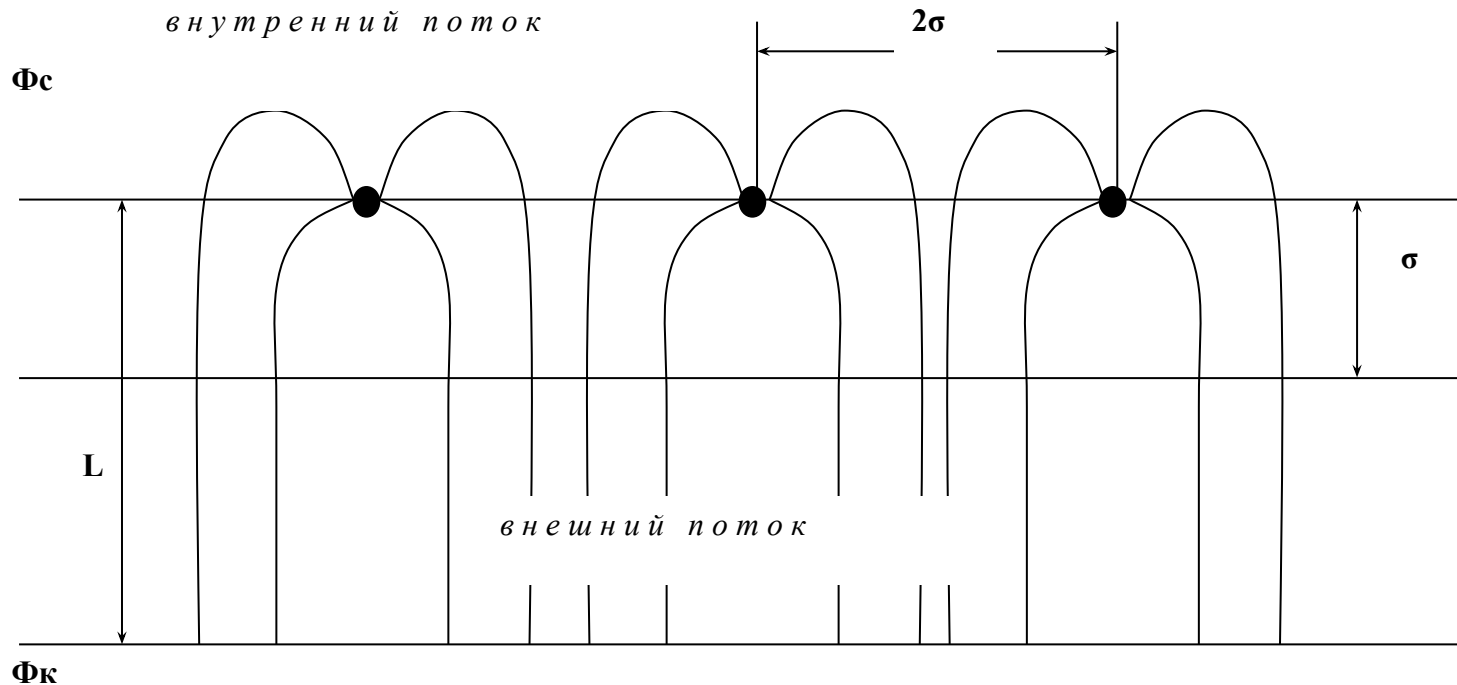
## Эффекты взаимодействия

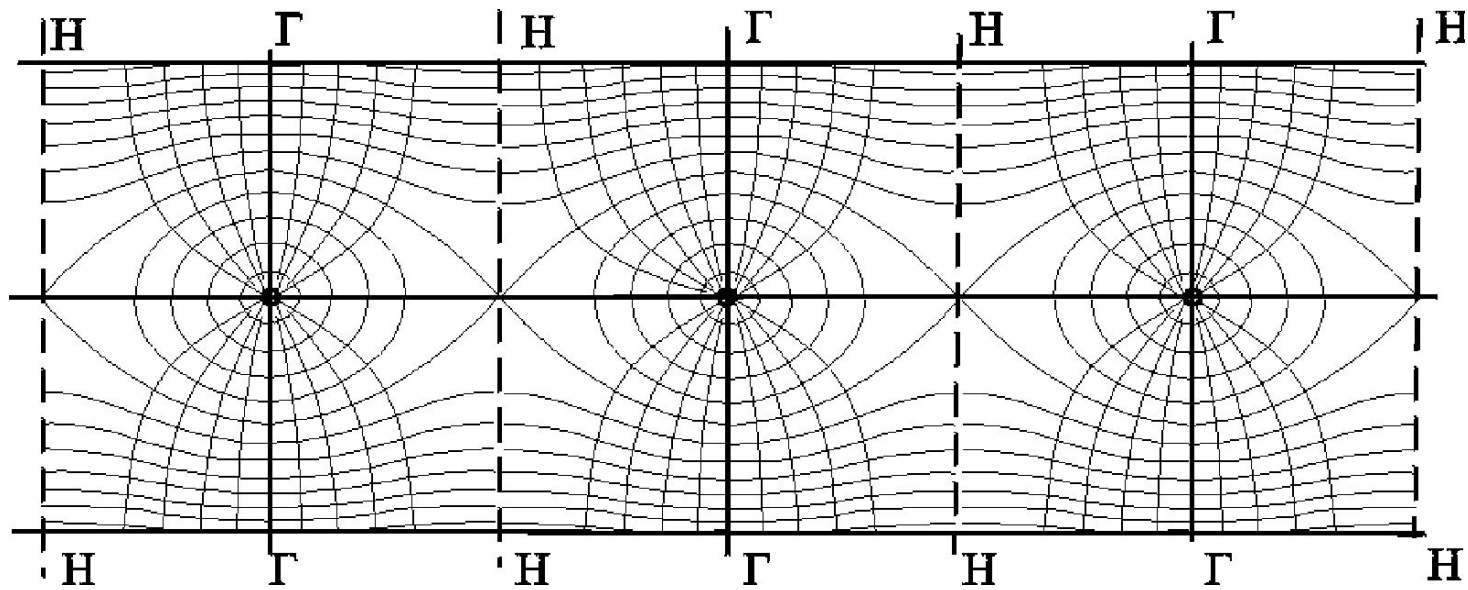
Величина дебитов скважин: равноудаленные от середины или от концов батареи - одинаковы, а при разной удаленности - отличаются.

Для однородных пластов и жидкостей относительные изменения дебитов скважин, вызванные эффектом взаимодействия, не зависят от физико-геологических характеристик пласта и от физических параметров жидкости.

Метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений предложен Ю.П. Борисовым и основан на аналогии движения жидкости в пористой среде с течением электрического тока в проводниках.

Для нахождения дебитов скважин цепочка скважин-стоков отображается зеркально относительно контура питания в скважины-источники, и рассматривается интерференция двух цепочек скважин в неограниченном пласте.





Главные  $\Gamma$  и нейтральные  $\text{H}$  линии тока перпендикулярны цепочке. Нейтральными линиями тока вся плоскость течения делится на бесконечное число полос, каждая из которых является полосой влияния одной из скважин, находящейся в середине расстояния между двумя соседними нейтральными линиями. Изобара, бесчисленное множество раз пересекающая сама себя, отделяет изобары внешнего течения ко всей батарее, охватывающих всю цепочку скважин, от изобар притока к скважине, охватывающих только данную скважину. Точки пересечения граничной изобары являются точками равновесия.

дебит каждой скважины цепочки

$$Q = \frac{2\pi h(\Phi_k - \Phi_c)}{\frac{\pi L}{\sigma} + \ln \frac{\sigma}{\pi R_c}} = \frac{2\pi Kh(P_k - P_c)}{\mu l \left( \frac{\pi L}{\sigma} + \ln \frac{\sigma}{\pi R_c} \right)}$$

$$\frac{L}{2\sigma h} = \Omega, \quad \frac{1}{2\pi h} \ln \frac{\sigma}{\pi R_c} = \omega.$$

$$Q = \frac{\Phi_k - \Phi_c}{\Omega + \omega}.$$

**Метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений (метод Борисова)** позволяет сложный фильтрационный поток в пласте при совместной работе нескольких батарей эксплуатационных и нагнетательных скважин разложить на простейшие потоки - к одиночно работающей скважине и к одиночно работающей батарее.

закон Ома

$$I = U / R$$

Дебит прямолин. батареи

$$G = \frac{(\varphi_k - \varphi_c)}{\frac{L}{nh\sigma} + \frac{1}{2\pi hn} \ln \frac{\sigma}{2\pi r_c}}$$

сопротивления

внешнее

внутреннее

**Внешнее фильтрационное сопротивление** - выражает фильтрационное сопротивление потоку от контура питания к участку прямолинейной бесконечной цепочки, занятому **n** скважинами, в предположении замены батареи галереей.

$$\frac{L}{2\sigma h} = \Omega$$

Дебит равен дебиту в прямолинейно-параллельном потоке через площадь величиной **n h σ** на длине **L**.

**Внутреннее сопротивление** - выражает местное фильтрационное сопротивление, возникающее при подходе жидкости к скважинам за счет искривлений линий тока

$$\frac{1}{2\pi h} \ln \frac{\sigma}{\pi R_c} = \omega$$

Дебит равен суммарному дебиту **n** скважин при плоскорадиальном течении, в предположении, что каждая скважина окружена контуром питания длиной **σ** (аналог формулы Дюпюи)

Схема 1

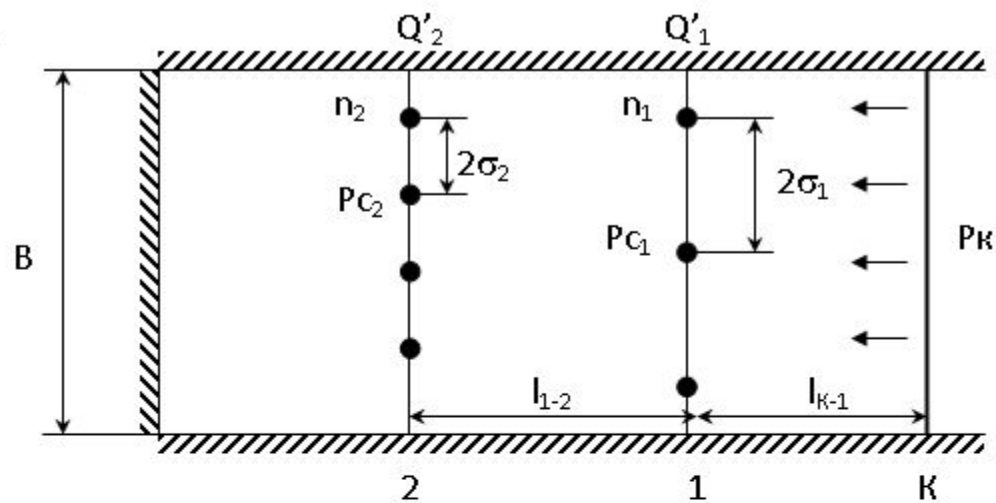
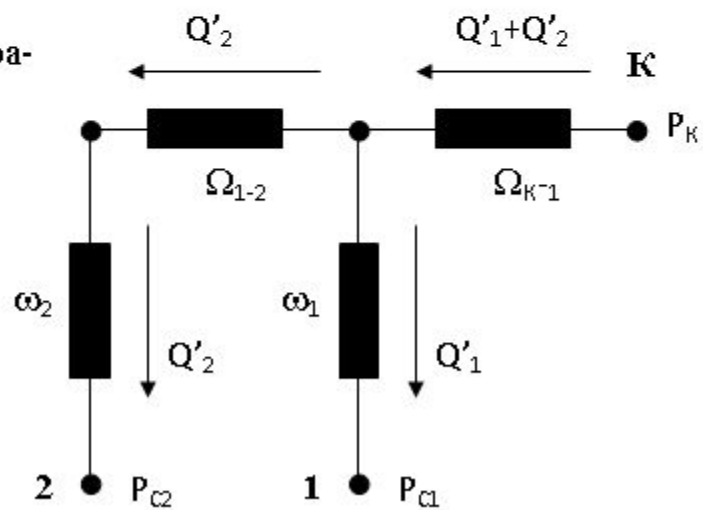


Схема эквивалентных фильтрационных сопротивлений





$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\kappa} - P_{c1} = (Q_1' + Q_2') \cdot \Omega_{k-1} + Q_1' \omega_1 \\ P_{c1} - P_{c2} = -Q_1' \cdot \omega_1 + Q_2' \cdot \Omega_{1-2} + \omega_2 \cdot Q_2' \end{array} \right.$$

- **внешние фильтрационные сопротивления**

$$\Omega_{K-1} = \frac{\mu l_{R-1}}{Bkh}, \quad \Omega_{1-2} = \frac{\mu l_{1-2}}{Bkh}$$

- **Внутренние фильтрационные сопротивления**

$$\omega_1 = \frac{\mu}{2\pi kh n_1} \ln \frac{\sigma_1}{\pi R_{c1}}, \quad \omega_2 = \frac{\mu}{2\pi kh n_2} \ln \frac{\sigma_2}{\pi R_{c2}}$$

## Приток к кольцевым батареям скважин

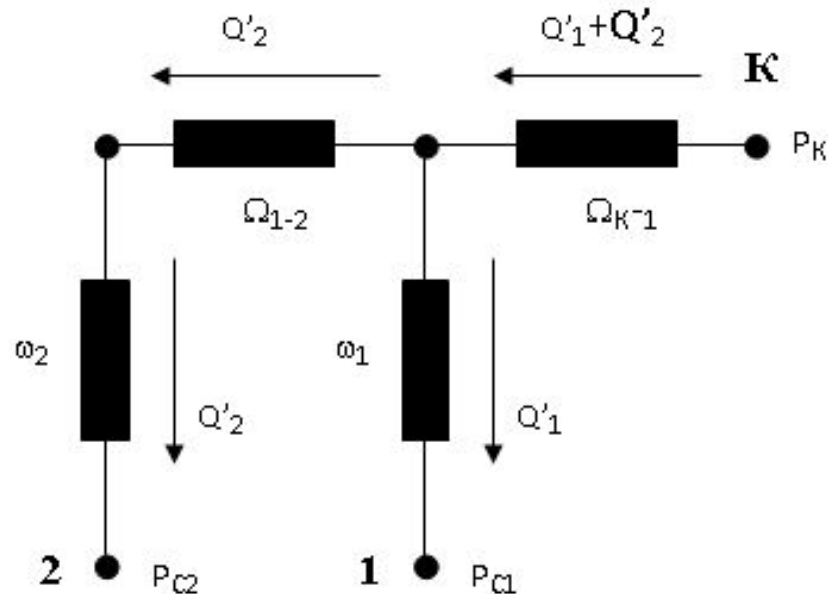
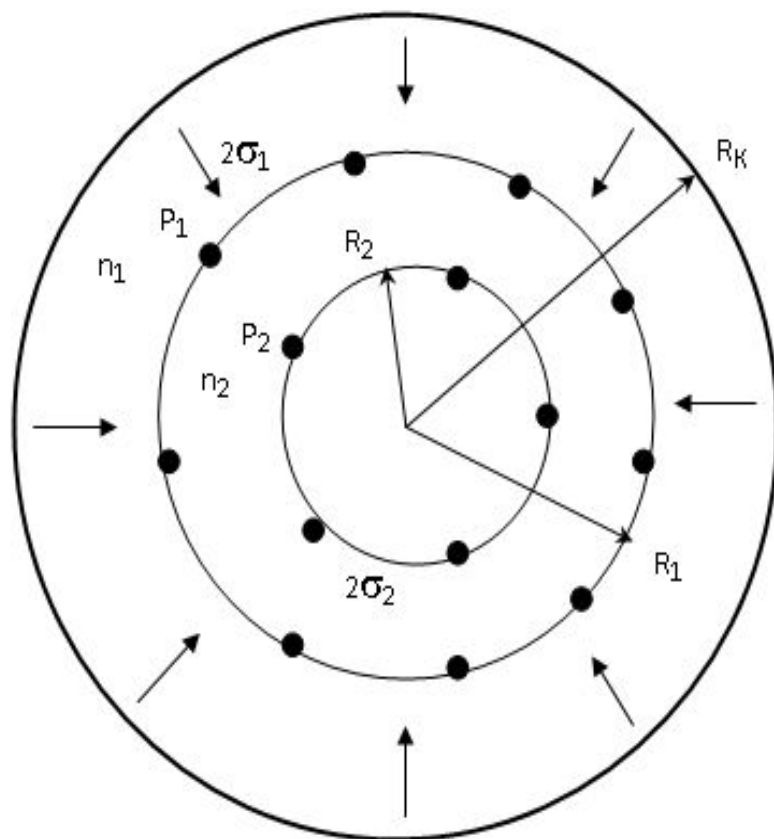


Схема эквивалентных фильтрационных сопротивлений

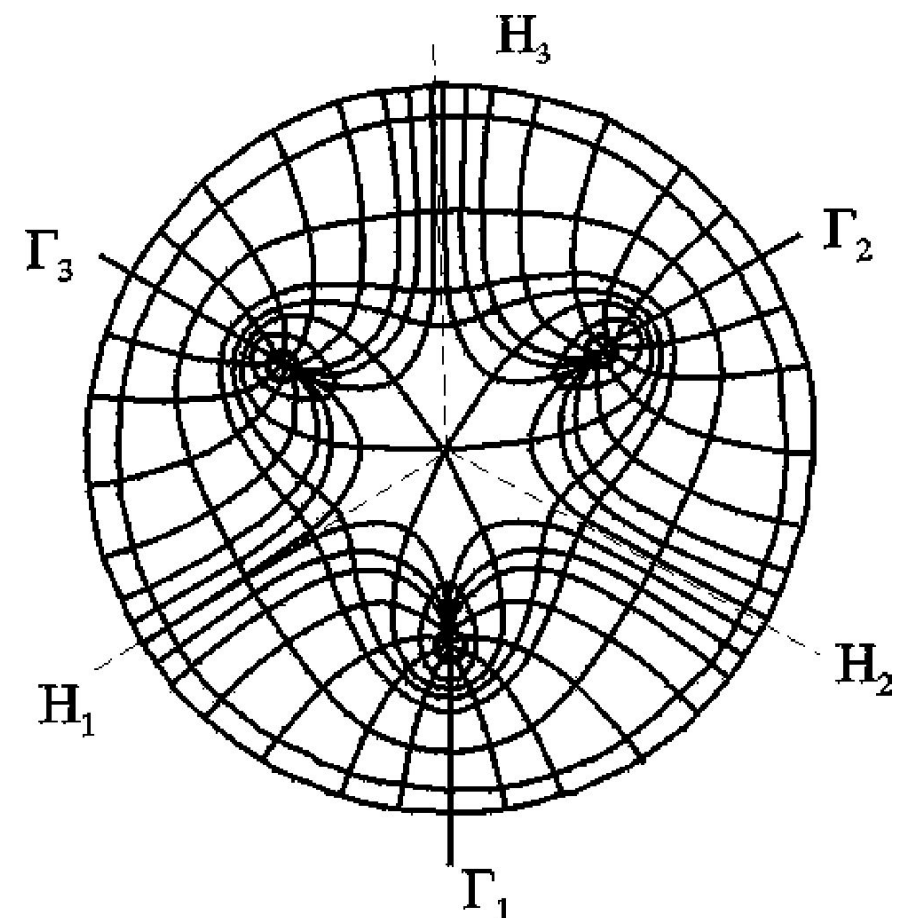
## Внешние фильтрационные сопротивления

$$\Omega_{K-1} = \frac{\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R_k}{R_1}, \quad \Omega_{1-2} = \frac{\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

## Внутренние фильтрационные сопротивления

$$\omega_1 = \frac{\mu}{2\pi kh n_1} \ln \frac{\sigma_1}{\pi R_{c1}}, \quad \omega_2 = \frac{\mu}{2\pi kh n_2} \ln \frac{\sigma_2}{\pi R_{c2}}$$

Нейтральные линии тока **Н** - сходятся в центре батареи и делят расстояние между двумя соседними скважинами пополам. Главные линии тока **Г** - проходят через центры скважин и делят сектор, ограниченный двумя нейтральными линиями, пополам.

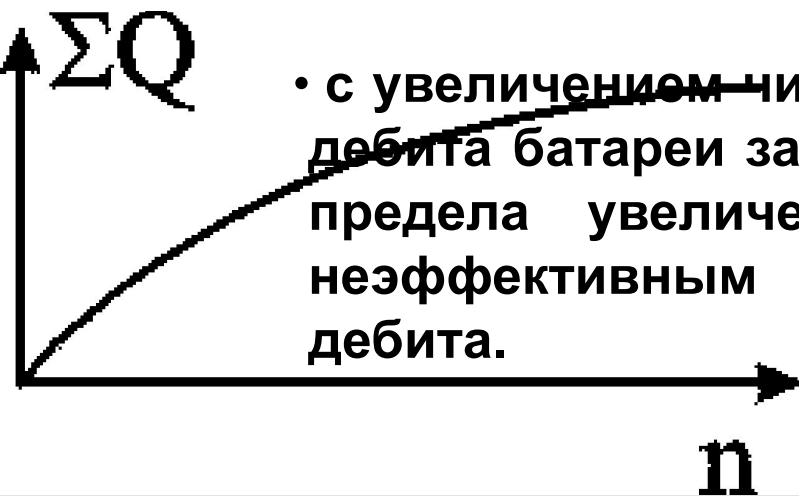


Скорость фильтрации по главным линиям максимальна, а по нейтральным линиям - минимальна. В центре кольцевой батареи скорость фильтрации равна нулю, т.е. частица жидкости, находящаяся в точке, в которой изобара пересекает сама себя, неподвижна. Такие точки фильтрационного поля называются точками равновесия и при разработке в окрестностях таких точек образуются “застойные области”.

Семейство изобар подразделяется на два подсемейства, которые разграничиваются изобарой пересекающей себя в центре батареи столько раз, сколько скважин составляет данную батарею. **Первое подсемейство изобар** определяет приток к отдельным скважинам и представляет собой замкнутые, каплеобразные кривые, описанные вокруг каждой скважины. **Второе семейство** - определяет приток к батарее в целом и представляет собой замкнутые кривые, описанные вокруг батареи.

# Оценки эффекта взаимодействия скважин круговой батареи:

- дебит изменяется непропорционально числу скважин и радиусу батареи (расстоянию между скважинами);
- с увеличением числа скважин дебит каждой скважины уменьшается при постоянном забойном давлении, т.е. растет эффект взаимодействия;
- взаимодействие скважин может практически не проявляться только при очень больших расстояниях между скважинами (в случае несжимаемой жидкости, строго говоря, влияние скважин распространяется на весь пласт);
- с увеличением числа скважин темп роста суммарного дебита батареи замедляется т.е. сверх определённого предела увеличение числа скважин оказывается неэффективным в виду прекращения прироста дебита.



# Анализ

1) с увеличением числа эксплуатационных скважин кольцевой батареи влияние их радиуса на дебит уменьшается, если отсутствует нагнетание жидкости в пласт;

2) если в центре батареи находится нагнетательная скважина, то влияние радиуса скважины на дебит будет больше, чем при отсутствии центрального нагнетания жидкости в пласт.

3) радиус скважины влияет на производительность больше, чем при одиночной эксплуатационной скважине. Число скважин мало влияет на производительность.



## Анизотропный пласт

Эффект взаимодействия будет значительно усиленным или ослабленным лишь при резком различии проницаемостей в двух определённых направлениях: в направлении линии расстановки скважин и в направлении перпендикулярном к этой линии.

Ослабление взаимодействия наблюдается в случае более низкой проницаемости в направлении линии расстановки скважин по сравнению с проницаемостью в перпендикулярном направлении. Усиление эффекта взаимодействия происходит в обратном случае. Таким образом, для уменьшения эффекта взаимодействия при закладывании новых скважин следует выбирать направление, в котором пласт наименее проницаем.