

## ТҮЙІН

Жұмыс көлемі: Диссертациялық жұмыс 61 беттен тұрады. Диссертациялық жұмыс кіріспеге, бөлімдерге бөлінген 4 негізгі бөлікке, сипатталуы бар 12 суретке, шығарылған әдебиеттер тізіміне бөлінеді.

Түйінді сөздер: жалпылама Дарси заңы, сұйық, салыстырмалы фазалық өткізгіштік, үзіліссіздік теңдеуі, Баклее- Леверетта функциясы, су өткізгіштігінің коэффициенті, кеуектілік, өткізгіштік, қысым, қанықтылық, радиалды айналма тор.

Жұмыс мақсаты:

- Гидродинамикалық байланысты екі қабатты аралық қабатшалардағы массалық тасымалдауды сандық зерттеу. Аралық қатпаршалардағы су-мұнай қозғалысын зерттеу және өндіріліп жатқан ұңғыманың жұмыс режимін жабу уақытын анықтау. Гидродинамикалық қосылыстардың коэффициенттеріне байланысты, бір уақытылы-бөлек аралық қатпаршалардың жеке даму режимінің шарттарын белгілеу.

Зерттеу нысаны:

- Әлсіз өткізгіш тормен бөлінген екі қабатты кеуекті ортадағы сығылмайтын екі фазалық сұйықтықтың қысымын және қанықтылығын өзгерту. Гидродинамикалық байланыстырылған аралық қатпаршалардың су басудың бес нүктелі жүйесінде массалық трансфертті анықтау.

Зерттеулер негізгі сүзу ағынына бағдарланған түпкілікті айырмашылықтар әдісімен жуықтау шешімі негізінде жүргізілді. Модельдеудің нәтижелері суреттер мен графиктер түрінде берілген.

## РЕФЕРАТ

Объем работы: Магистерская диссертация из 61 страниц. Магистерская диссертация подразделяется на введение, 4 основных раздела с подразделами, 12 картинок с описаниями, вывода и списка используемой литературы.

Ключевые слова: обобщенный закон Дарси, жидкость, относительная фазовая проницаемость, уравнение неразрывности, функция Баклея - Леверетта, коэффициент гидропроницаемости, пористость, проницаемость, давление, насыщенность, радиально кольцевая сетка.

Цель работы:

- Численное исследование массопереноса в гидродинамически связанных двухслойных пропластках. Изучение продвижения водонефтяного контакта в пропластках и определения времени отключения эксплуатационного режима добывающей скважины. В зависимости от гидродинамических коэффициентов связей, установка условий режима одновременно – раздельной разработки пропластков.

Объект исследования:

- Изменение давления и насыщенности несжимаемой двухфазной жидкости в двухслойной пористой среде разделенной слабопроницаемой перемычкой. Определение массопереноса в пятиточечной системе площадного заводнения гидродинамически связанных пропластках.

Исследования проводились на основе приближенного решения методом конечных разностей ориентированных против основного фильтрационного потока. Результаты моделирования представлены в виде рисунков и графиков.

## ABSTRACT

Scope of work: This dissertation consists of 61 pages. Dissertation is divided into an introduction, 4 main sections with subsections, 12 pictures with descriptions, conclusion and references.

Keywords: general Darcy law, liquid, relative phase permeability, the continuity equation, the Buckley-Leverett function, coefficient of water permeability, porosity, permeability, pressure, saturation, radially annular mesh.

Purpose of the work:

- Numerical study of mass transfer in hydrodynamically bound two-layer interlayers. Study of the progress of water-oil contact in the interlayers and determination of the time of shutting down the operating regime of the production well. Depending on the hydrodynamic coupling coefficients, the setting conditions of the regime simultaneously - separate development of interlayers.

Object of study:

- Change in pressure and saturation of an incompressible two-phase liquid in a two-layer porous medium separated by a weakly permeable web. Determination of mass transfer in the five-point system of the flooding of hydrodynamically connected interlayers.

Results of the work: The investigations were carried out on the basis of an approximate solution by the method of finite differences oriented against the main filtration flow. The simulation results are presented in the form of figures and graphs.

## Содержание

Введение.....	6
Сокращенные слова символы и обозначения.....	7
1 Математическая модель двухфазной несжимаемой и несмешивающейся жидкости.....	9
1.1.Основные представления теории двухфазного течения в пористых средах.....	9
1.2.Математическая модель вытеснения нефти водой Баклей – Леверетта.....	10
2 Модель многослойного пласта.....	14
2.1 Постановка задачи вытеснения нефти водой в нескольких пластах.....	14
2.2 Осреднение полученной модели по толщине пропластков с учетом перетока через слабопроницаемую перемычку.....	15
2.3 Радиально – кольцевая сетка в окрестности нагнетательных скважин.....	17
3 Конечно-разностная схема вычисления давления и насыщенности в двух пластах .....	20
3.1 Определение поля давления в окрестности нагнетательной скважины.....	20
3.2 Метод приближенного вычисления функции насыщенности (Интегро-интерполяционный метод).....	24
3.3 Конечно-разностная схема в окрестности нагнетательной скважины.....	25
4 Гидродинамика площадного заводнения двухслойных пропластков различной проницаемости.....	27
4.1 Используемые гидродинамические и коллекторские параметры.....	27
4.2 Численное решение производственной задачи представленная в графическом виде.....	27
5 Реализация программы вычислительного алгоритма расчетов на языке C++.....	42
5.1 Язык программирования C++.....	42
5.2 Программный код.....	43
Вывод.....	59
Список использованных источников.....	60

## Введение

Подземная гидромеханика — наука о движении жидкости, газов и их смесей в пористых и трещиноватых горных породах. Подземная гидромеханика рассматривает особый вид движения жидкости — фильтрацию.

В нефтегазовой отрасли она позволяет определить характер изменения скоростей фильтрации и движения жидкости, распределения давления по длине пласта от контура питания до скважины; определение дебита, коэффициента продуктивности, время прохождения фильтрующейся жидкости от контура до скважины. Полученные данные позволяют решать задачи прогнозирования и контроля разработки нефтяных, газовых, нефтегазовых и газоконденсатных пластов. Кроме того, в решении учитываются характер неоднородности пласта, характер несовершенства скважины.

Пласт вскрыт гидродинамически совершенной скважиной, такая скважина является теоретической и используется для учебных расчётов. Существует чёткое разделение между водной и нефтяной зонами, что свидетельствует о поршневом вытеснении, которое принимается при теоретических расчётах.

Вытеснение нефти водой является одним из основных методов повышения продуктивности пласта. Этот метод применяется в Казахстане и за рубежом, так как он один из сравнительно простых методов применяемых при добыче нефти после того как иссякла естественная энергия пласта.

Основой метода является закачка воды в продуктивный пласт через нагнетательные скважины. Могут применяться рядные, контурные и точечные системы заводнения.

## Сокращенные слова, символы и обозначения

$V$  – Скорость фильтрации

$H$  – Толщина хорошопроницаемого пласта

$h$  – Толщина плохопроницаемого пласта

$h_{\Pi}$  – Толщина перемычки

$m$  – Пористость

$k_x$  – Коэффициент абсолютной проницаемости хорошопроницаемого пласта

$k_c$  – Коэффициент абсолютной проницаемости плохопроницаемого пласта

$k_{\Pi}$  – Коэффициент абсолютной проницаемости перемычки

$P$  – Давление

$\nabla P, gradP$  – Градиент давления

$t$  – Время

$s_i$  – Насыщенность  $i$ -й фазы

$k_i^*$  – Относительная проницаемость  $i$ -й фазы

$s_{o1}$  – остаточная вода

$s_{o2}$  – остаточная нефть

$s$  – Насыщенность воды

$s^*$  – Насыщенность остаточной воды

$(1 - s^*)$  – Насыщенность остаточной нефти

$F(s)$  – Функция Баклея - Леверетта

$\sigma_i = k_i H / \mu$  – Коэффициент гидропроводности  $i$ -го пропластка

$\sigma_0$  – Коэффициент суммарной гидропроводности

$\rho_i$  – Плотность жидкости ( $i=1$  воды,  $i=2$  нефти)

$\mu_i$  – Коэффициент вязкости ( $i=1$  воды,  $i=2$  нефти)

$r_c$  – Радиус скважины

$\Omega$  – Рассматриваемая область

$d\Omega$  – Граница рассматриваемой области

$x, y, z$  – Пространственные координаты

$\varepsilon$  – Погрешность

$\gamma$  – Коэффициент гидродинамической связи

$q_i$  – Дебит ( $i=1$  воды,  $i=2$  нефти)

$h, \tau$  – Шаг сетки и шаг по времени соответственно

$r, R$  – Радиусы

$i, j, k$  – Индексы суммирования

# 1 Математическая модель двухфазной несжимаемой и несмешивающейся жидкости

## 1.1 Основные представления теории двухфазного течения в пористых средах

Формирование залежей происходит путем оттеснения из пластов коллекторов первоначально находившейся там воды. Поэтому вместе с нефтью и газом в коллекторах всегда содержится некоторое количество (обычно 10-30%, иногда до 70% порового объема) так называемой погребенной воды. Кроме того, многие продуктивные пласты заполнены нефтью и газом лишь в купольной зоне, а нижележащие зоны заполнены краевой водой. Самые верхние части нефтяных залежей содержат газ, образующий так называемые газовые шапки. Таким образом, даже в ненарушенном состоянии в природных пластах может находиться несколько подвижных фаз. Двухфазное течение возникает практически во всех случаях разработки нефтяных месторождений, поскольку движущие нефть силы возникают вследствие упругости или гидравлического напора воды.

Введем основные характеристики многофазного течения – насыщенность и скорость фильтрации. Доля объема пор в элементарном микрообъеме, охватывающем данную произвольную точку, занятого  $i$ -й фазой, называется насыщенностью порового пространства этой фазой в данной точке и обозначается  $S_i$ . Очевидно что для двухфазного течения оно будет равно

$$S_1 + S_2 = 1, \quad S_2 = 1 - S, \quad S_i = \frac{S_i}{V_p}$$

Учитывая то что мы берем несжимаемую жидкость запишем также уравнение неразрывности

$$m \frac{\partial S_i}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{v}_i = 0 \quad (1.1)$$

Т.е. для каждой фазы уравнение будет выглядеть в следующем виде:

$$\begin{cases} m \frac{\partial S}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{v}_B = 0 \\ m \frac{\partial (1-S)}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{v}_H = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Обобщенный закон Дарси для двухфазной жидкости:



$$\vec{v}_i = -K \frac{K_i^*(S)}{\mu_i} \text{grad}P \quad (1.3)$$

Применим его для полученной системы уравнений

$$+ \begin{cases} m \frac{\partial S}{\partial t} = \text{div} \left( K \frac{K_B^*(S)}{\mu_B} \text{grad}P \right) \\ m \frac{\partial(1-S)}{\partial t} = \text{div} \left( K \frac{K_H^*(S)}{\mu_H} \text{grad}P \right) \end{cases} \quad (1.4) \Rightarrow$$

Сложив данные уравнения получим:

$$\text{div} \frac{K}{\mu_B} (K_B^*(S) + \mu_0 K_H^*(S)) \text{grad}P = 0$$

$$\sigma_0 = \frac{K}{\mu_B} (K_B^*(S) + \mu_0 K_H^*(S))$$

$$m \frac{\partial S_1}{\partial t} + \text{div} (F(S) \vec{W}) = 0$$

Где  $\vec{W} = \vec{v}_B + \vec{v}_H$  или  $\vec{W} = \vec{W}_x \vec{i} + \vec{W}_y \vec{j}$  - скорость фильтрации потока  
Полный фильтрационный поток будет иметь вид:

$$\vec{W} = -kH \left[ \frac{k_S^*(S)}{\mu_S} + \frac{k_H^*(S)}{\mu_H^*} \right] \text{grad}P \quad (1.5)$$

## 1.2 Математическая модель вытеснения нефти водой Баклей - Леверетта

Заданный процесс является примером работы скважины на водонапорном режиме. Нефть вытесняется в добывающую скважину из продуктивного пласта под действием напора воды закачиваемого в нагнетательную скважину. В нефтеносном контуре образуются водная и нефтяная части, а так же водонефтяной контакт .

При отборе жидкости из скважины частицы жидкости в пласте будут двигаться по горизонтальным прямолинейным траекториям, радиально сходящимся к центру скважины. Такой фильтрационный поток называется плоскорадиальным. В начальный момент времени, при наличии в пласте только нефти можно применить расчётную схему и зависимости для плоскорадиального фильтрационного потока.

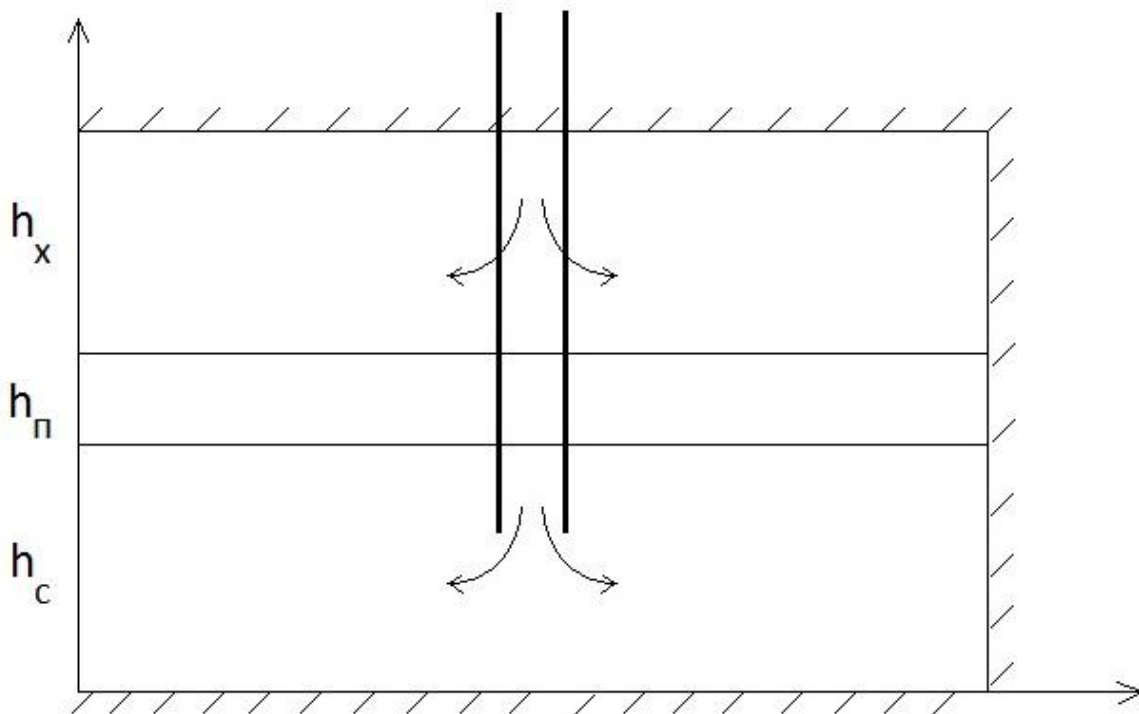


Рис. 1 – Нагнетание воды в два пласта

Рассмотрим задачу о вытеснении нефти водой в условиях плоскорadiaльного движения по закону Дарси в пласте.

$$\vec{v}_i = -K \frac{K_i^*(s)}{\mu_i} \nabla P \quad \text{где } i = 1 \text{ вода, } i = 2 \text{ нефть} \quad (1.6)$$

На контуре питания радиуса  $R_k$  поддерживается постоянное давление  $p_k$ , на забое скважины радиуса  $r_c$  – постоянное давление  $p_c$ , толщина пласта  $h$  и его проницаемость  $k$  также постоянны. Обозначим через  $R_0$  и  $r_n$  соответственно начальное и текущее положение контура нефтеносности, concentричные скважине и контуру питания, через  $p_b$  и  $p_n$  – давление в любой точке водоносной и нефтеносной области соответственно, через  $p$  – давление на границе раздела жидкостей.

Нагнетание количества воды при двухфазном течений описывается функцией Баклея – Леверетта

$$F(s) = \frac{k_1^*(s)}{k_1^*(s) + \mu_0 k_2^*(s)} \quad (1.7)$$

$\sigma_0$  – коэффициент гидропроводности,

$$\sigma_0 = k(k_b^*(s) + \mu_0 k_n^*(s)), \quad (1.8)$$

Где  $\mu_0 = \frac{\mu_1}{\mu_2}$  , Здесь  $\mu_1$  – коэффициент вязкости воды,  $\mu_2$  – коэффициент вязкости нефти

Учитывается также уравнение неразрывности и насыщенность пропластка:

$$m \frac{\partial s_i}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{v}_i = 0 \quad (1.9)$$

$$S_1 + S_2 = 1$$

Где  $S_1$  - насыщенность воды, а  $S_2$  - насыщенность нефти  
Получается что для фильтрационного потока:

$$\operatorname{div}(\vec{v}_B + \vec{v}_H) = 0$$

$$\operatorname{div}(\sigma^* \operatorname{grad} P) = 0$$

А для воды уравнение неразрывности имеет вид:

$$m \frac{\partial S_1}{\partial t} + \operatorname{div} (F(S) \vec{W}) = 0 \quad (1.10)$$

Таким образом получаем полный фильтрационный поток:

$$\vec{W} = -K \frac{K_B^*(S)}{\mu_B} \operatorname{grad} P - K \frac{K_H^*(S)}{\mu_H} \operatorname{grad} P = -K \left( \frac{K_B^*(S)}{\mu_B} - \frac{K_H^*(S)}{\mu_H} \right) \operatorname{grad} P \quad (1.11)$$

Ниже представим зависимость между насыщенностью  $S$  и относительной фазовой проницаемостью  $K^*(S)$

Линейная

$$K_B^*(S) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 < S \leq S_* \\ \frac{S - S_*}{1 - S_*}, & \text{если } S_* < S < 1 \end{cases}$$

$$K_H^*(S) = \begin{cases} 1 - \frac{S}{S_*}, & \text{если } 0 < S < S_* \\ 0, & \text{если } S_* \leq S < 1 \end{cases}$$

Квадратичная

$$K_B^*(S) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 < S \leq S_* \\ \frac{(S - S_*)^2}{1 - S_*}, & \text{если } S_* < S < 1 \end{cases}$$

$$K_H^*(S) = \begin{cases} \left(1 - \frac{S}{S_*}\right)^2, & \text{если } 0 < S < S^* \\ 0, & \text{если } S^* \leq S < 1 \end{cases}$$

Степенная

$$K_B^*(S) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 < S \leq S_* \\ 1.55(S - S_*)^{3.01}, & \text{если } S_* < S < 1 \end{cases}$$

$$K_H^*(S) = \begin{cases} 1.59(S^* - S)^{2.20}, & \text{если } 0 < S < S^* \\ 0, & \text{если } S^* \leq S < 1 \end{cases}$$

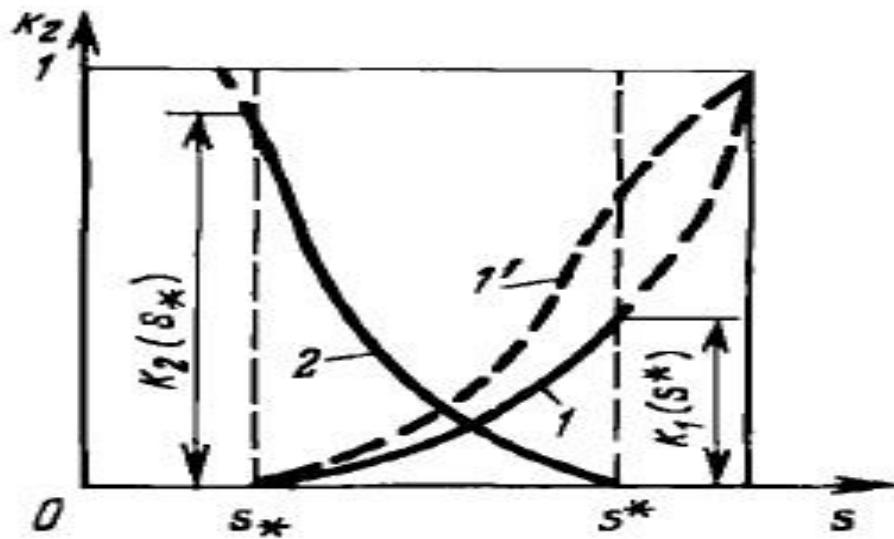


Рис. 2 - Зависимость между насыщенностью  $S$  и относительной фазовой проницаемостью  $K^*(S)$

## 2 Модель многослойного пласта

### 2.1 Постановка задачи вытеснения нефти водой в нескольких пластах

Предполагается, что пласт состоит из слоев различной проницаемости. Их число может быть произвольным. Слои гидродинамики изолированы, но термически контактируют. Пористость и связанная водонасыщенность слоев в общем случае различны, между слоями могут находиться слабопроницаемые глинистые перемычки, в каждом из слоев вытеснение идет автономно. Распределение давлений и насыщенности в слоях различно.

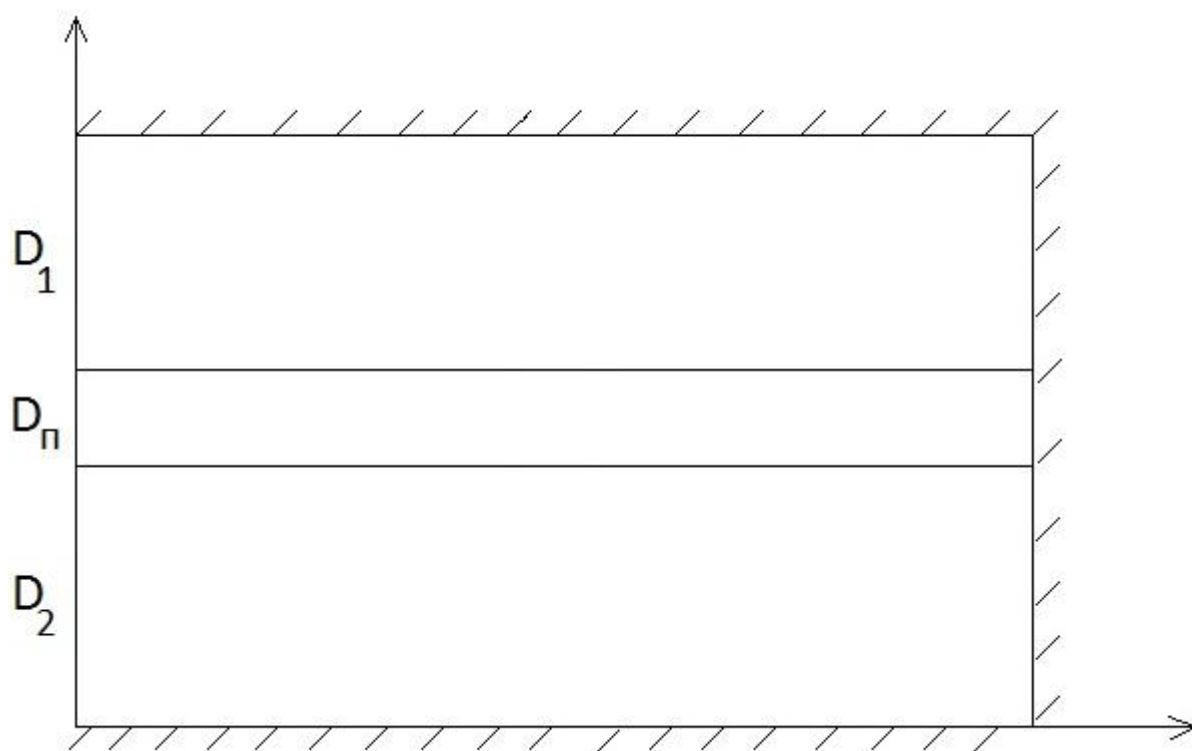


Рис. 3 – Система пропластков разделенных слабопроницаемой перемычкой в разрезе

В области  $\bar{D} \equiv \bar{D}_1 \cup \bar{D}_2 \cup \bar{D}_n$  при  $t > 0$  найти распределения давления  $P(x, y, z, t)$  и насыщенности  $S(x, y, z, t)$  удовлетворяющие во внутренних точках  $\bar{D}_1 \cup \bar{D}_2 \cup \bar{D}_n$  системе уравнений

$$\begin{cases} m_l \frac{\partial s_l}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_l(s) \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_l(s) \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_l(s) \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Условиями сопряжения на линиях  $\overline{D_1} \cup \overline{D_{II}}$  и  $\overline{D_{II}} \cup \overline{D_2}$

$$\begin{aligned} P_- = P_+, \sigma_1^* \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_- &= -\frac{K_{II}}{H_{II}} \sigma^*(S_{1,2})(P_1 - P_2) \Big|_+, \sigma_2^* \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_+ = + \\ &= -\frac{K_{II}}{H_{II}} \sigma^*(S_{1,2})(P_1 - P_2) \Big|_- \end{aligned} \quad (2.2)$$

Начальным условиям

$$P(x, y, z, 0) = \psi_1(x, y, z), \quad S(x, y, z, 0) = \psi_2(x, y, z) \quad (2.3)$$

И граничным условиям

$$P(0,0,z,t) \Big|_{z \in (z_1, z_2)} = \varphi_1(z, t), \quad \frac{\partial P(0,0,z,t)}{\partial x} \Big|_{z \in (z_1, z_2)} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial z} P(x, y, 0, t) = \frac{\partial}{\partial z} P(x, y, H, t) = 0$$

Где  $\sigma_l = \frac{K_l}{\mu_l} (K_B^* + \mu_0 K_H^*(S))$  гидропроводность пласта  $l = 1, 2$

$$F_l(S) = \frac{K_B^*(S)}{K_B^*(S) + K_H^*(S)} \rightarrow \quad (2.4)$$

Функция Баклея - Леверетта,  $\mu_0 = \frac{\mu_B}{\mu_H}$

## 2.2 Осреднение полученной модели по толщине пропластков с учетом перетока через слабопроницаемую перемычку

Осредним неизвестные непрерывные функции по толщине каждого пропластка т.к.

$$K_{II} \ll K_1, K_{II} \ll K_2, \quad H_1 \cup H_2 \ll L_x, H_1 \cup H_2 \ll L_y$$

Проинтегрируем уравнение (1) по мощности  $H_l$  пласта ( $l = 1$ )

$$\int_{-H_1/2}^{H_1/2} m_l \frac{\partial S_l}{\partial t} dz = \left( \frac{\partial S_l}{\partial t} \right)_{cp} (m_l)_{cp} H_l \quad (2.5)$$

$$\text{Где } (m_l)_{cp} = \frac{1}{H_l} \int_{-H_1/2}^{H_1/2} m_l dz \quad (2.6)$$

Для следующего интеграла применяем формулу дифференцирования по параметру

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{-H_1/2}^{H_1/2} \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial x} dz = \int_{-H_1/2}^{H_1/2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial x} \right) dz = \frac{\sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{H_1/2}}{2} H'_{lx} + \frac{\sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{-H_1/2}}{2} H'_{lx} \quad (2.7)$$

Считая что мощность меняется около постоянного значения плавно или проницаемость вблизи границы равна нулю, последними двумя членами можно пренебречь по отношению к предыдущему. Тогда будем иметь с учетом

$$\sigma_l = \frac{K_l}{\mu_l} (K_B^* + \mu_0 K_H^*(S)) \quad (2.8)$$

$$\int_{-H_1/2}^{H_1/2} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_1}{\mu_B} (K_B^* + \mu_0 K_H^*(S)) \frac{\partial P}{\partial x} \right] dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H_1/2}^{H_1/2} \frac{K_1}{\mu_B} (K_B^* + \mu_0 K_H^*(S)) \frac{\partial P}{\partial x} dz \quad (2.9)$$

А применяя теорему о среднем к интегралу, стоящему в правой части равенства, получим:

$$\begin{aligned} & \int_{-H_1/2}^{H_1/2} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_1}{\mu_B} (K_B^* + \mu_0 K_H^*(S)) \frac{\partial P}{\partial x} \right] dz \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)_{cp} \int_{-H_1/2}^{H_1/2} \frac{K_1}{\mu_B} (K_B^* + \mu_0 K_H^*(S)) dz \right] \end{aligned} \quad (2.10)$$

Применяя последнему теорему о среднем еще раз, будем иметь

$$\int_{-H_1/2}^{H_1/2} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_1}{\mu_B} (K_B^* + \mu_0 K_H^*(S)) \frac{\partial P}{\partial x} \right] dz = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_1 H_1}{\mu} (K_B^* + \mu_0 K_H^*(S)) \frac{\partial P}{\partial x} \right]_{cp} \quad (2.11)$$

$$\text{Где } \frac{K_1}{\mu} (K_B^* + \mu_0 K_H^*(S))_{cp} = \frac{1}{H_1} \int_{-H_1/2}^{H_1/2} \frac{K_1}{\mu} (K_B^* + \mu_0 K_H^*(S)) dz \quad (2.12)$$

Аналогично оцениваются и другие интегралы.

Интеграл связанный с переменной  $z$ , запишем в следующем виде:

$$\int_{-H_1/2}^{H_1/2} \frac{\partial}{\partial z} \sigma_1^* \frac{\partial P}{\partial x} dz = \sigma_1^* \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{H_1/2} - \sigma_1^* \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{-H_1/2} = \sigma_1^* \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{H_1/2} \quad (2.14)$$

Здесь через подошву  $l=1$ -го пласта переток отсутствует, а через кровлю с учетом граничного условия (2.2) имеем:

$$\sigma_1^* \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{H_1/2} = -\frac{K_{\Pi}}{H_{\Pi}} \sigma^*(S_{1,2})(P_1 - P_2)$$

Соответственно для второго пласта:

$$\sigma_2^* \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{H_1+H_{\Pi}+H_2} = -\frac{K_{\Pi}}{H_{\Pi}} \sigma^*(S_{1,2})(P_1 - P_2)$$

Система уравнений (2.1), осредненная по толщине пропластков с учетом перетока через слабопроницаемую перемычку, окончательно запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\sigma_l^* \operatorname{grad} P_l) = N_l \\ \operatorname{div}(F_l \sigma_l^* \operatorname{grad} P_l) = m_l H_l \frac{\partial S_l}{\partial t} + F_l N_l \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\text{Где } N_l = (-1)^l \frac{K_{\Pi}}{H_{\Pi} \mu_{\text{в}}} \left( K_{\text{в}}^*(S_{1,2}) + \mu_0 K_{\text{н}}^*(S_{1,2}) \right) (P_2 - P_1) \quad (2.16)$$

Где насыщенность равна:

$$S_{1,2} = \begin{cases} S_1, & \text{если } P_1 > P_2 \\ S_2, & \text{если } P_1 < P_2 \end{cases}$$

Эта формула означает что мы берем насыщенность того пласта, у которого давление больше.

$$\sigma_l^* = \frac{K_l H_l}{\mu_{\text{в}}} \left( K_{\text{в}}^*(S_l) + \mu_0 K_{\text{н}}^*(S_l) \right) \quad (2.17)$$

$$F_l(S) = \frac{K_{\text{в}}^*(S)}{K_{\text{в}}^*(S) + K_{\text{н}}^*(S)} \quad (2.18)$$

### 2.3 Радиально - кольцевая сетка в окрестности нагнетательных скважин

Для фильтрационных задач, содержащих изолированные особенности типа скважин, представляется целесообразным использование комбинированных сеток: на основную равномерную и прямоугольную сетку накладывается возле особенности вторая более мелкая (в нашем случае радиальная) сетка.

При крупном шаге (30-50м) детали вытеснения в призабойной зоне, если не накладывать второй более мелкой сетки, пропадают.



Усреднение в пределах ячейки, соответствующей нагнетательной или добывающей скважине, приводит к качественному искажению картины вытеснения.

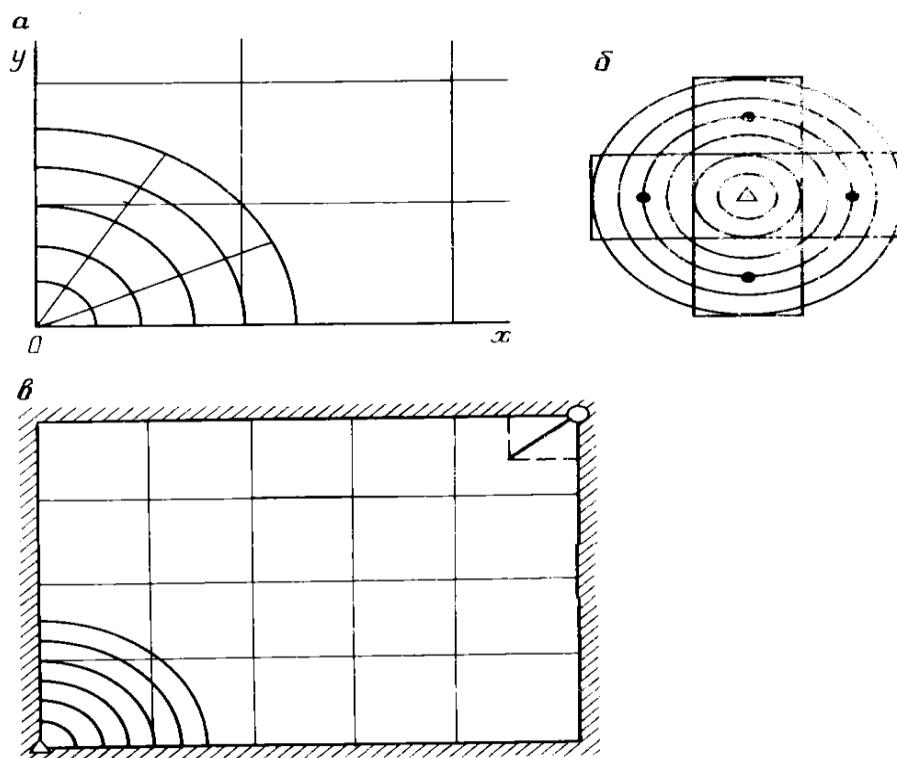


Рис. 4 - Построение комбинированной сетки

а - Наложение полярной сетки на прямоугольную возле скважины

б - Выделение радиальных зон вокруг нагнетательной скважины

в - Комбинированная сетка для пятиточечной системы

Для более точного описания вытеснения в зоне вокруг нагнетательной скважины до ближайших узлов сетки в пределах самой ячейки и четырех соседних ячеек накладывается кольцевая сетка, состоящая из шести concentric колец. В пределах каждого кольца вводится значение насыщенности

Насыщенность ячеек, соответствующих нагнетательной и соседним с нею скважинам, можно вычислить по их значениям в кольцевых зонах. Из рисунка 4 видно, что насыщенность ячейки  $(i,j)$ , в которой расположена нагнетательная скважина, можно найти по формуле:

$$S_{ij} = \frac{[\pi r_1^2 s_1 + \pi(r_2^2 - r_1^2) s_2 + \pi(r_0^2 - r_2^2) s_3]}{\Delta x^2} \quad (2.19)$$

Окрестности нагнетательной скважины на расстоянии шага сетки с учетом влияния радиуса скважины при  $\rho = \Delta x, \Delta y$

Приведем радиально - кольцевую сетку с постоянным шагом, таким образом накладываем мягкую сетку для полярной системы координат, т.е.

$$x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi, r^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2$$

С учетом новых переменных получаем новые уравнения для насыщенности и давления в полярных координатах:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial r} \right) = N_l \rightarrow \text{давление} \quad (2.20)$$

$$m_l H_l \frac{\partial S_l}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left( r F_l \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial r} \right) - F_l N_l \rightarrow \text{насыщенность} \quad (2.21)$$

Для неоднородного по площади пласта, когда проницаемость ячейки (i,j) и соседних с нею ячеек различны, кольцевая зона разбивается еще на четыре сектора, ориентированных по узлам сетки. Но для однородного пласта предположение радиальности течения возле нагнетательной скважины оправдывается с достаточной для практики точностью.

### 3. Конечно разностная схема вычисление давления и насыщенности в двух пластах

#### 3.1 Определение поля давления в окрестности нагнетательной скважины

При совместной разработке пропластков единой системой скважин одним из гидродинамических методов повышения нефтеотдачи является одновременно раздельная эксплуатация (ОРЭ). Метод направлен на обеспечение более равномерного вытеснения нефти из пласта. Однако процесс вытеснения нефти водой во вскрытых скважинами пропластках, разделенных слабопроницаемыми перемычками, еще недостаточно изучен. Исследование такого процесса проведем с помощью вычислительных экспериментов.

Рассмотрим двухфазную фильтрацию, подчиняющуюся обобщенному закону Дарси, осредненную по толщине пропластков с учетом перетока через слабопроницаемую перемычку и описываемую системой уравнений ()

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\sigma_l^* \operatorname{grad} P_l) = N_l \\ \operatorname{div}(F_l \sigma_l^*) = m_l H_l \frac{\partial S_l}{\partial t} + F_l(S) N_l \end{cases} \quad l = 1, 2 \quad (3.1)$$

Здесь  $l$  определяет номер пласта:  $l = 1$  первый пласт,  $l = 2$  второй пласт.  $N_l$  определяется формулой:

$$N_l = (-1)^l \frac{K_{\Pi}}{H_{\Pi}} K^*(S_{1,2})(P_2 - P_1), \quad S_{1,2} = \begin{cases} S_1, & P_1 > P_2 \\ S_2, & P_2 > P_1 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\sigma_l^* = H_l K_l K^*(S_l), \quad K^* = \frac{K_{\text{в}}^*}{\mu_{\text{в}}} + \frac{K_{\text{н}}^*}{\mu_{\text{н}}} \quad (3.3)$$

Исследуем теперь двухфазную фильтрацию в пятиточечном элементе площадного заводнения, когда совершенные скважины вскрывают пласт, состоящий из двух пропластков:  $l = 1$  первый пласт,  $l = 2$  второй пласт, разделенные слабопроницаемой перемычкой.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial y} \right) = N_l \quad (l = 1, 2) \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( f_l \sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( f_l \sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial y} \right) = m_l N_l \frac{\partial S_l}{\partial t} + f_l N_l \quad (3.5)$$

На гладкой поверхности построим прямоугольную сетку по переменным  $x$  и  $y$  где

$$x = ih_1, y = ih_2, i, j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

$h_1, h_2$  – шаг сетки по осям  $x$  и  $y$ . В случае когда  $h_1 = h_2 = h$  сетка становится квадратной.

Обозначим область интегрирования нашего уравнения  $D_h = \{h \times h; x_{i-1/2} \leq x \leq x_{i+1/2}, y_{j-1/2} \leq y \leq y_{j+1/2}\}$

Запишем уравнение в общем виде:

$$\int_{x-h/2}^{x+h/2} \int_{y-h/2}^{y+h/2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial y} \right) \right] dx dy = \int_{x-h/2}^{x+h/2} \int_{y-h/2}^{y+h/2} q_c \delta(x - x_c, y - y_c) dx dy \quad (3.6)$$

Здесь:

$$q_{ck} = \frac{2\pi\sigma_{c,l}^k}{\ln\left(\frac{0,2^4}{\sqrt{r}}\right)} (P_l - P_{ck}) \quad (3.7)$$

Далее это уравнение интегрируется и записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \left[ \int_{y-h/2}^{y+h/2} \sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial x} dy \right]_{x+h/2} - \left[ \int_{y-h/2}^{y+h/2} \sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial x} dy \right]_{x-h/2} \\ & + \left[ \int_{x-h/2}^{x+h/2} \sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial y} dx \right]_{y+h/2} - \left[ \int_{x-h/2}^{x+h/2} \sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial y} dx \right]_{y-h/2} \\ & = \int_{x-h/2}^{x+h/2} \int_{y-h/2}^{y+h/2} q_c \delta(x - x_c, y - y_c) dx dy \end{aligned} \quad (3.8)$$

Рассмотрим течение по оси  $x$  в области ячейки сетки (рисунок 3)

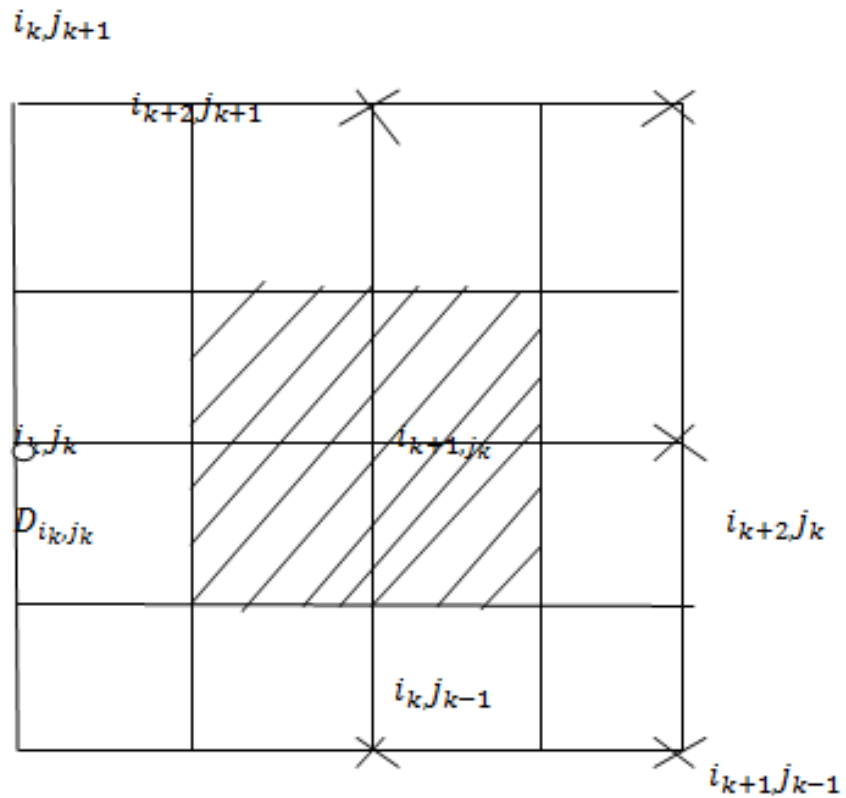


Рис. 5. Область ячейки в окрестности нагнетательной скважины

Возьмем  $w(x,y)$  обозначив первый поток через  $\sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial x}$ ю Тогда:

$$\int_{y-h/2}^{y+h/2} \sigma_l^* \frac{\partial P_l}{\partial x} dy \Big|_{x+h/2} = \int_{y-h/2}^{y+h/2} w(x+h/2, t_2) dt_2 \quad (3.9)$$

Из этого следует что в промежутке  $[y-h/2, y+h/2]$  Поток  $w_l$  устойчив, а если взять окрестность точки  $y$ , тогда

$$\int_{y-h/2}^{y+h/2} w_l(x+h/2, t_2) dt_2 = w_l(x+h/2, y) \quad (3.10)$$

Теперь определим значения функции  $w$  в узлах сетки

$$\frac{\partial P_l}{\partial x} = \frac{w_l}{\sigma_l^*} \quad (3.11)$$

Проинтегрируем на отрезке  $[x, x+h]$

$$\int_x^{x+h} \frac{\partial P_l}{\partial x} (t_1, t_2) dt_1 = \int_x^{x+h} \frac{w_l(t_1, t_2)}{\sigma_l^*(t_1, t_2)} dt_1 \quad (3.12)$$

Или в следующем виде:

$$P_l(x+h, t_2) - P(x, t_2) = \int_x^{x+h} \frac{w_l(t_1, t_2)}{\sigma_l^*(t_1, t_2)} dt_1 \quad (3.14)$$

Так как фильтрационный поток  $w$  на отрезке  $[x, x+h]$  устойчив и равен центральному значению отрезка, перепишем его учитывая из последнего уравнения что  $t_2 = y$

$$w_l\left(x + h/2, y\right) = \frac{P_l(x+h, y) - P(x, y)}{h \frac{1}{h} \int_x^{x+h} \frac{1}{\sigma_l^*(t_1, y)} dt_1} \quad (3.15)$$

Здесь приближенно вычисляя интеграл

$$\frac{1}{\sigma_{l, i+1/2}^*} = \frac{1}{h} \int_x^{x+h} \frac{1}{\sigma_l^*(t_1, y)} dt_1 \approx \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_l(x, y)} + \frac{1}{\sigma_l(x+h, y)} \right) \quad (3.16)$$

Запишем конечно разностную схему:

$$w_l\left(x + h/2\right) = \sigma_{l, i+1/2, y}^* \frac{P_l(x+h, y) - P(x, y)}{h} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} & \left( \sigma_{l, i+1/2, y}^* \frac{P_l(x+h, y) - P(x, y)}{h} - \sigma_{l, i-1/2, y}^* \frac{P_l(x+h, y) - P(x, y)}{h} \right) \Big|_h \\ & + \left( \sigma_{l, x, j+1/2}^* \frac{P_l(x+h, y) - P(x, y)}{h} - \sigma_{l, x, j-1/2}^* \frac{P_l(x+h, y) - P(x, y)}{h} \right) \Big|_h \\ & = \frac{1}{h^2} \int_{x-h/2}^{x+h/2} \int_{y-h/2}^{y+h/2} q_{ck} \delta(x - x_c, y - y_c) dx dy \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\int_{x-h/2}^{x+h/2} \int_{y-h/2}^{y+h/2} q_{ck} \delta(x - x_c, y - y_c) dx dy = \begin{cases} q_{ck}, & x = x_l, y = y_l \\ 0, & x \neq x_l, y \neq y_l \end{cases} \quad (3.19)$$

Расчет количества жидкости на скважинах осуществляется по этой формуле

$$q_{ck} = \frac{2\pi\sigma_{cp}}{\ln\left(\frac{0,2R_k}{r_c}\right)} (P - P_{ck}) \quad (3.20)$$

Где  $P_{ck}$  – давление нагнетенной воды или добытой нефти

### 3.2 Метод приближенного вычисления функции насыщенности (Интегро-интерполяционный метод)

Учитывая полную скорость фильтрации введем фазовую скорость ВОДЫ:

$$\vec{v}_B = F(S)\vec{W}$$

$$\vec{v}_H = (1 - F(S))\vec{W}$$

Перепишем уравнение в следующем виде:

$$\text{div } \vec{v}_l = m_l H_l \frac{\partial S_l}{\partial t} + F_l N_l \quad (3.21)$$

Интегрируем это выражение по области ячейки:

$$\begin{aligned} \int_{x^{-h/2}}^{x^{+h/2}} \int_{y^{-h/2}}^{y^{+h/2}} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \vec{v}_l + \frac{\partial}{\partial y} \vec{v}_l \right] dx dy &= \int_{x^{-h/2}}^{x^{+h/2}} \int_{y^{-h/2}}^{y^{+h/2}} \left[ m_l H_l \frac{\partial S_l}{\partial t} + f_l N_l \right] dx dy \\ &= \int_{x^{-h/2}}^{x^{+h/2}} \int_{y^{-h/2}}^{y^{+h/2}} q_{ck} F dx dy \end{aligned} \quad (3.22)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \int_{y^{-h/2}}^{y^{+h/2}} \left[ v_{l,i+1/2,y} - v_{l,i-1/2,y} \right] dy + \int_{x^{-h/2}}^{x^{+h/2}} \left[ v_{l,x,j+1/2} - v_{l,x,j-1/2} \right] dx \\ = m_l H_l \frac{\partial}{\partial t} \int_{x^{-h/2}}^{x^{+h/2}} \int_{y^{-h/2}}^{y^{+h/2}} S dx dy + \int_{x^{-h/2}}^{x^{+h/2}} \int_{y^{-h/2}}^{y^{+h/2}} q_{ck} F dx dy \end{aligned} \quad (3.23)$$

Применив интегро-интерполяционный метод полную скорость фильтрации можно записать в следующем виде:

$$\vec{v} = F\vec{W} = -F(S) * \sigma^* \text{grad} P_l \quad (3.24)$$

Отсюда мы применим конечно-разностную схему ориентированную против основного потока. Функция Баклей-Левретта будет аппроксимироваться следующим образом:

$$\vec{w} > 0 \text{ тогда } \begin{cases} F_{i-1/2,j} = F_{i-1,j} \\ F_{i+1/2,j} = F_{i,j} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\vec{w} < 0 \text{ тогда } \begin{cases} F_{i-1/2,j} = F_{i,j} \\ F_{i+1/2,j} = F_{i+1,j} \end{cases} \quad (3.26)$$

Это правило используется также для оси  $y$ . Например  $(i + 1/2, j)$ :

$$v_{i+1/2,j} = w_{i+1/2,j} \left[ \frac{1}{2} (1 + \text{Sign}w_{i+1/2,j}) F_{i,j} + \frac{1}{2} (1 - \text{Sign}w_{i+1/2,j}) F_{i+1,j} \right] \quad (3.27)$$

Или для  $(i - 1/2, j)$ :

$$v_{i-1/2,j} = w_{i-1/2,j} \left[ \frac{1}{2} (1 + \text{Sign}w_{i-1/2,j}) F_{i-1,j} + \frac{1}{2} (1 - \text{Sign}w_{i-1/2,j}) F_{i,j} \right] \quad (3.28)$$

Здесь

$$q_{ck} = \frac{2\pi\sigma_{cp}F(S)}{\ln\left(\frac{0,2\cdot Rk}{r_c}\right)} (P - P_{ck}) \quad (3.29)$$

### 3.3 Конечно разностная схема

Здесь насыщенность пропластка рассчитывается конечно-разностной схемой ориентированной против основного потока, а функция давления рассчитывается методом Зейделя. Полная фильтрация течения записывается в следующем виде:

$$\vec{v}_B = F(S)\vec{W}$$

$$\vec{v}_H = (1 - F(S))\vec{W}$$

Не учитывая номер пласта рассматривается уравнение в общем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( v_l(s)\sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_l(s)\sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.30)$$



$$m_l \frac{\partial s_l}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma_l^* \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.31)$$

Для эксплуатационной скважины уравнение (3.30) аппроксимируется следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta x} \left( \sigma_{i+1/2,j}^* \frac{p_{i+1,j} + p_{i,j}}{\Delta x} - \sigma_{i-1/2,j}^* \frac{p_{i,j} + p_{i-1,j}}{\Delta x} \right) \\ & + \frac{1}{\Delta y} \left( \sigma_{i+1/2,j}^* \frac{p_{i,j+1} + p_{i,j}}{\Delta y} - \sigma_{i-1/2,j}^* \frac{p_{i,j} + p_{i,j-1}}{\Delta y} \right) \\ & = \frac{2\pi\sigma_{i,j}^*}{\Delta x \Delta y} \frac{p_{i,j} - p_{ck}}{\ln\left(\frac{0,2\Delta x}{r_c}\right)} \end{aligned} \quad (3.32)$$

А уравнение насыщенности (3.31) аппроксимируется:

$$\begin{aligned} & \frac{s_{i,j}^{k+1} - s_{i,j}^k}{\Delta t} + \frac{u_{i+1/2,j} F_{i+1,j} - u_{i-1/2,j} F_{i-1,j}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1/2} F_{i,j+1} - v_{i,j-1/2} F_{i,j-1}}{\Delta y} \\ & = \frac{q_{ck} F_{i,j}}{\Delta x \Delta y} \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$q_{ck} = \frac{2\pi\sigma_{i,j}^*(p_{i,j} - p_{ck})}{\ln(0,2\Delta x/r_c)} \quad (3.34)$$

Условие выполнимости функции насыщенности:

$$\Delta t \leq \frac{m}{F'(s) \max\left(\frac{u}{\Delta x} + \frac{v}{\Delta y}\right)} \quad (3.35)$$

#### 4. Гидродинамика площадного заводнения двухслойных пропластков различной проницаемости

В этом разделе представлены численные решения, алгоритмы, и графики поставленной производственной задачи.

##### 4.1 Используемые гидродинамические и коллекторские параметры

Область обозначим квадратом в узлах которого четыре добывающих скважины. В центре расположена нагнетающая скважина. Вода закачивается в два пласта одновременно. Приняты следующие гидродинамические и коллекторские параметры:

$$H = 10 \text{ м}, h_c = 6 \text{ м}, h_{\Pi} = 1 \text{ м} \quad S(x, y, 0) = s_{*B}, \quad S(x_0, y_0, 0) = 1 - s_{*B}, \\ S(x_0, y_0, t) = \phi s^* = 1 - s_{*H},$$

$$k_x = 0.5 \text{ Д}, k_c = 0.1 \text{ Д}, k_{\Pi} = 10^{-5} \text{ Д}$$

$$P(x_0, y_0, t) = P_{\text{наг}} = 15 \text{ МПа}, P(x_c, y_c, t) = P_{\text{доб}} = 12 \text{ МПа},$$

$$k_c^* = \frac{(s-0.2)^2}{0.8} (0.2 \leq s \leq 1),$$

$$k_M^* = \left(1 - \frac{s}{0.8}\right)^2 (0 \leq s \leq 1);$$

$$k_c^* = \frac{s-0.2}{0.8} (0.2 \leq s \leq 1),$$

$$k_M^* = 1 - \frac{s}{0.8} (0 \leq s \leq 1).$$

$$\mu_c = 1 \text{ СПЗ}, \mu_M^* = 4.5 \text{ СПЗ}, m = 0.3, k = 0.5 \text{ Д}, s_{*c} = 0.2, s_{*M} = 1 - s^*$$

##### 4.2 Численное решение производственной задачи представленная в графическом виде

Гидродинамические взаимодействия двухслойных пропластков численно исследовались при постоянном режиме заданных забойных давлений. На рисунках 1.1 1.2 2.1 2.2 показаны графики изменения давления и насыщенности после периода разработки пропластка  $T=300$  сут. В зависимости от насыщенности на эксплуатационных скважинах были построены режимы регулирования нагнетания воды в

нефтяной пласт. При достижений в одном из пропластков предельного значения остаточной водонасыщенности добывающей скважины, определяется режим прекращения нагнетания воды в данный пропласток. В нашем варианте после одновременной закачки воды в двухслойный пропласток, через период  $T=300$ сут водонасыщенность добывающей скважины превышает норму, т.е. после регулирования режима работы скважины, закачка воды в первый пропласток прекращается. Этот случай показан на рис 2.1 при этом водонасыщенность на скважине лежит между  $0.2 \leq s \leq 0.25$  таким образом второй режим начинается с закачки воды в плохо проницаемый пласт после периода  $T=300$  сут времени разработки, при этом величина забойного давления на нагнетательных скважинах не изменяется. Для периода разработки  $T=300$  суток изменение давления и насыщенности показан на рисунке 1.1 и 2.1, а поверхностный изосад и изобарические поверхности показаны на рисунках 1.2 2.2 соответственно. Достижение водонефтяного контакта в добывающей скважине хорошо проницаемого пласта хорошо видно на рис 2.1.

На рисунках 1.1 – 4.2 показаны изменения давления и насыщенности в пропластках 1 и 2 после совместной разработки 300 сут

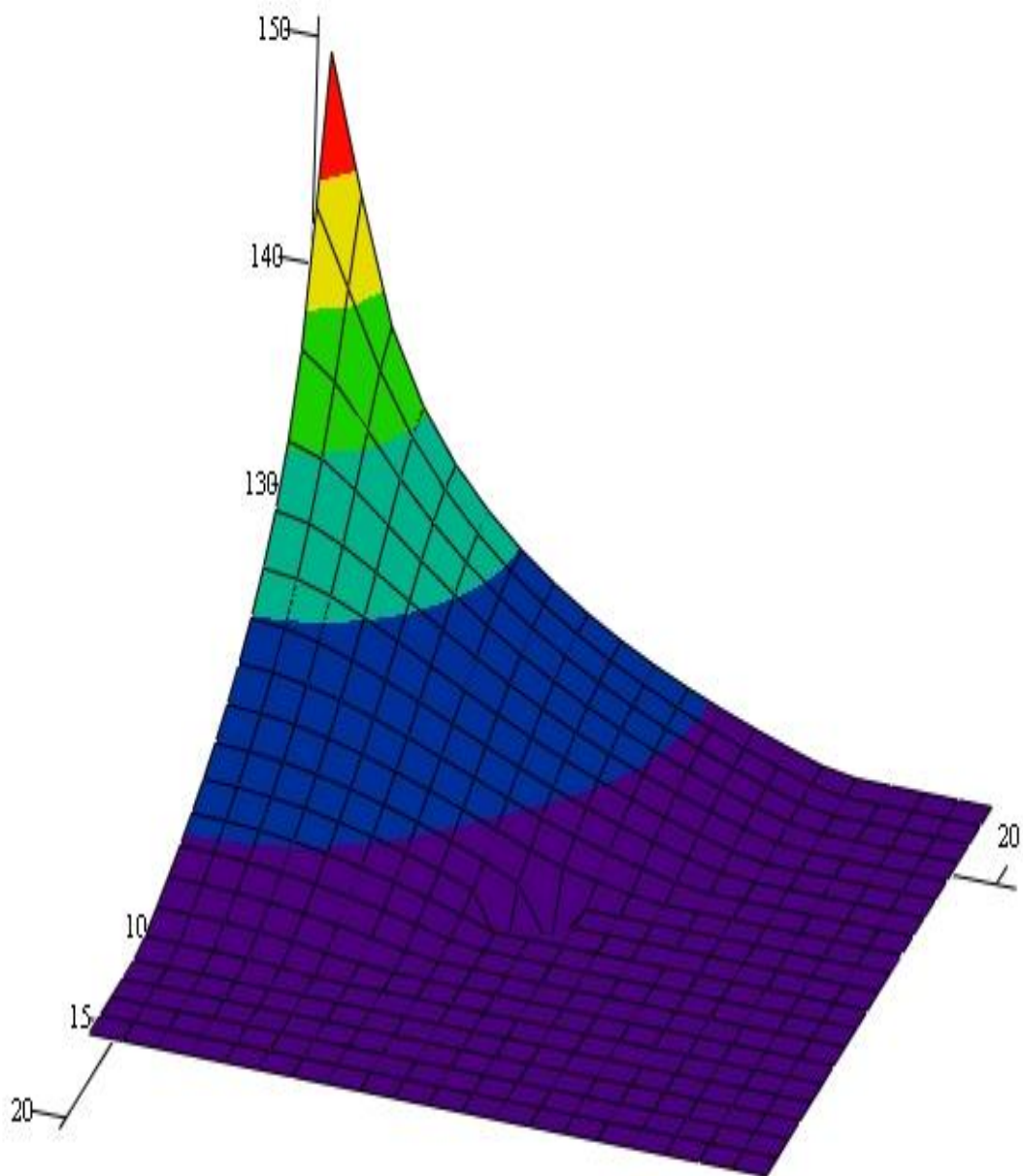


Рис 1.1 Изменение давления для хорошопроницаемого пласта в случае совместной разработки.

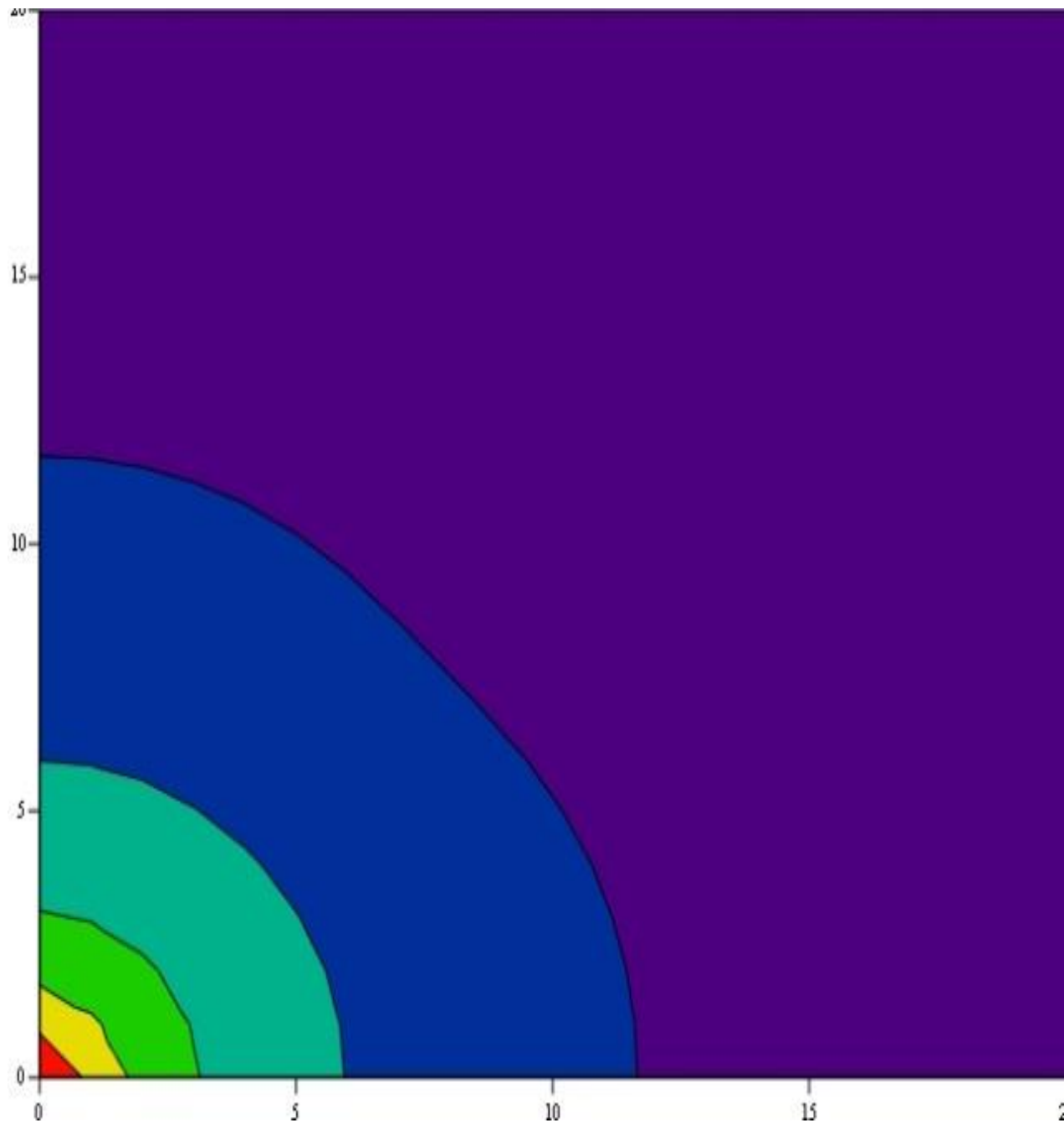


Рис 1.2 Положение изобарической поверхности для плохопроницаемого пласта в случае совместной разработки.

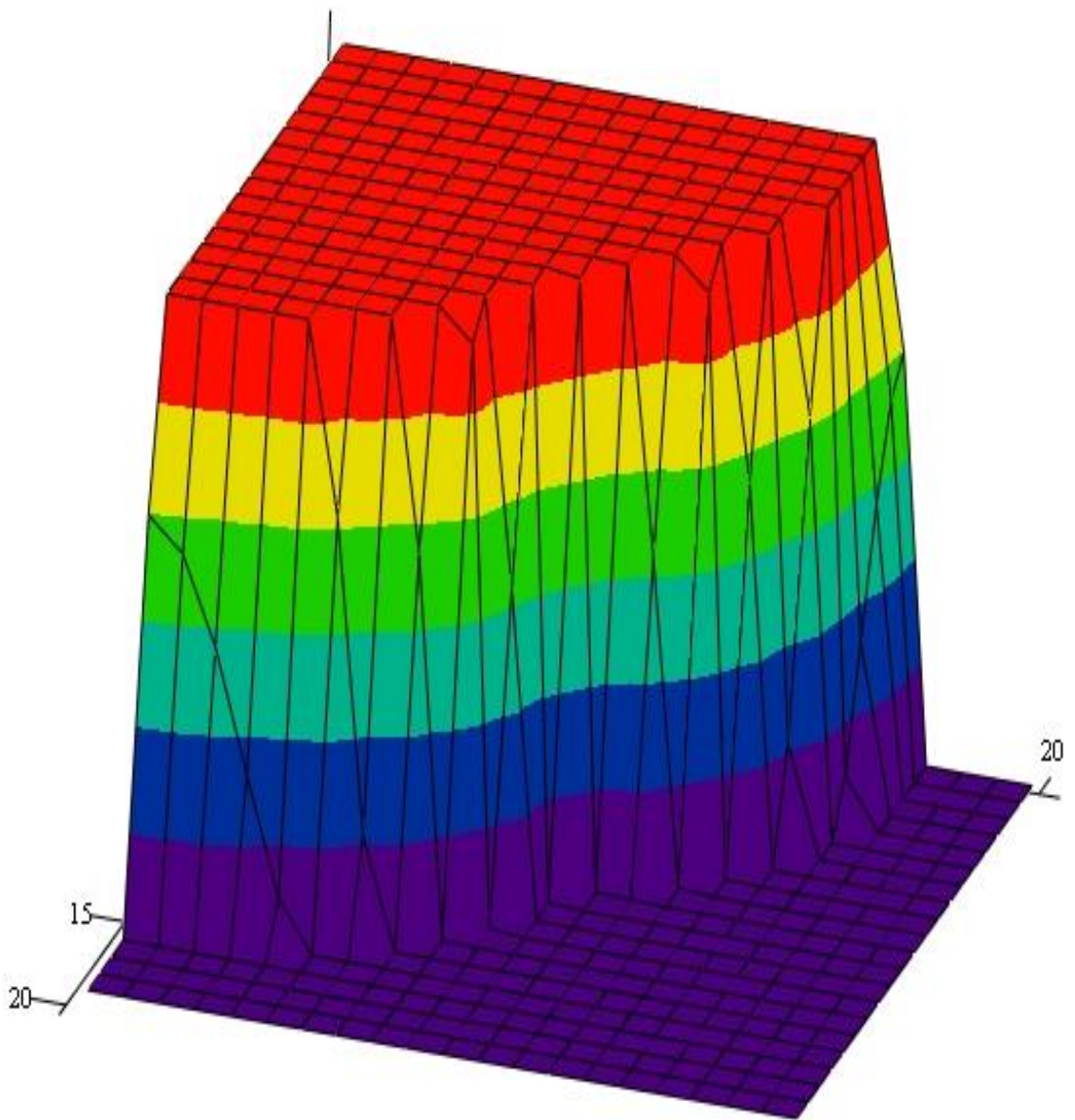


Рис 2.1 Изменение насыщенности для хорошопроницаемого пласта в случае совместной разработки

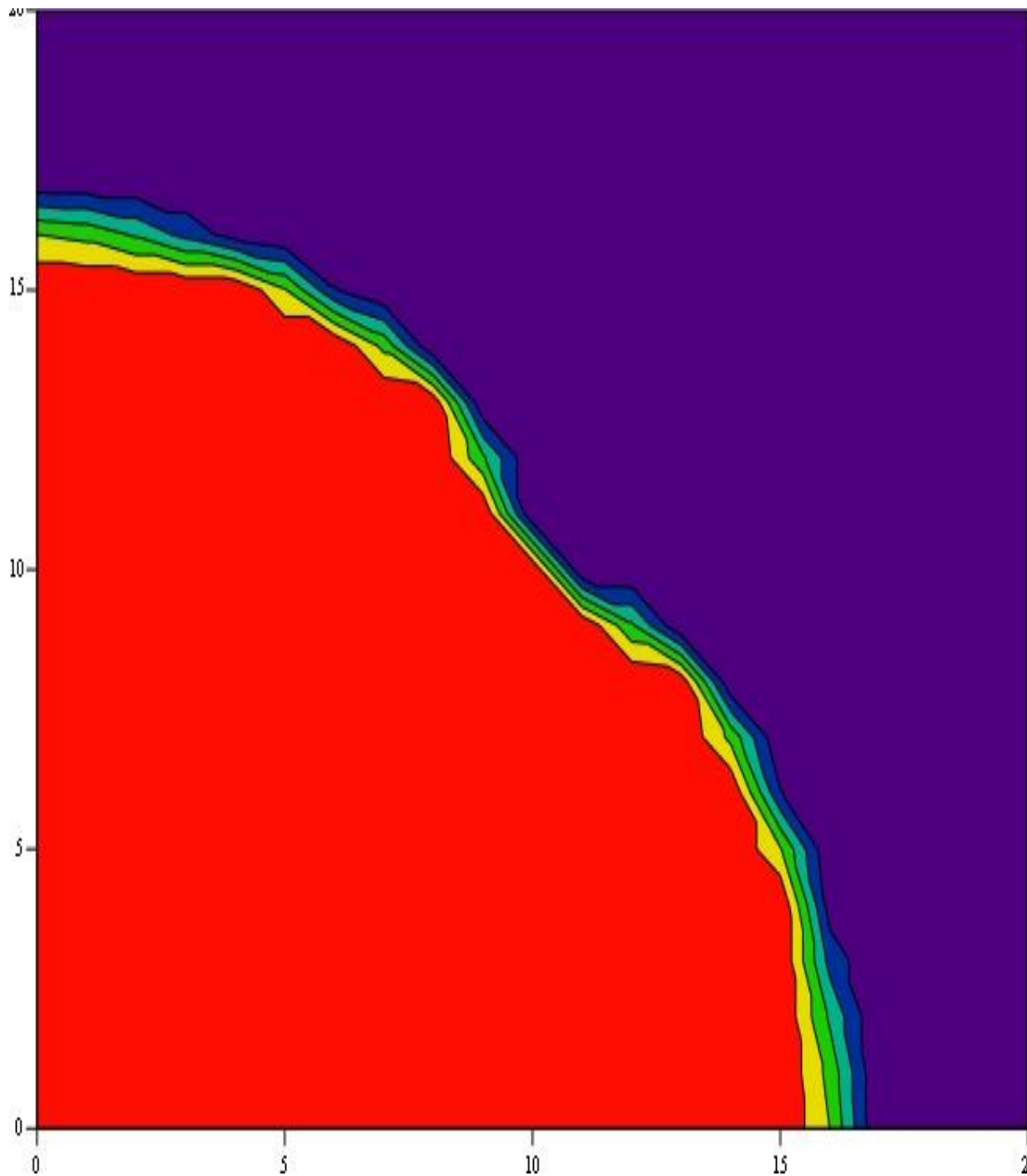


Рис 2.2 Изменение поверхности изосад для хорошопроницаемого пласта в случае совместной разработки

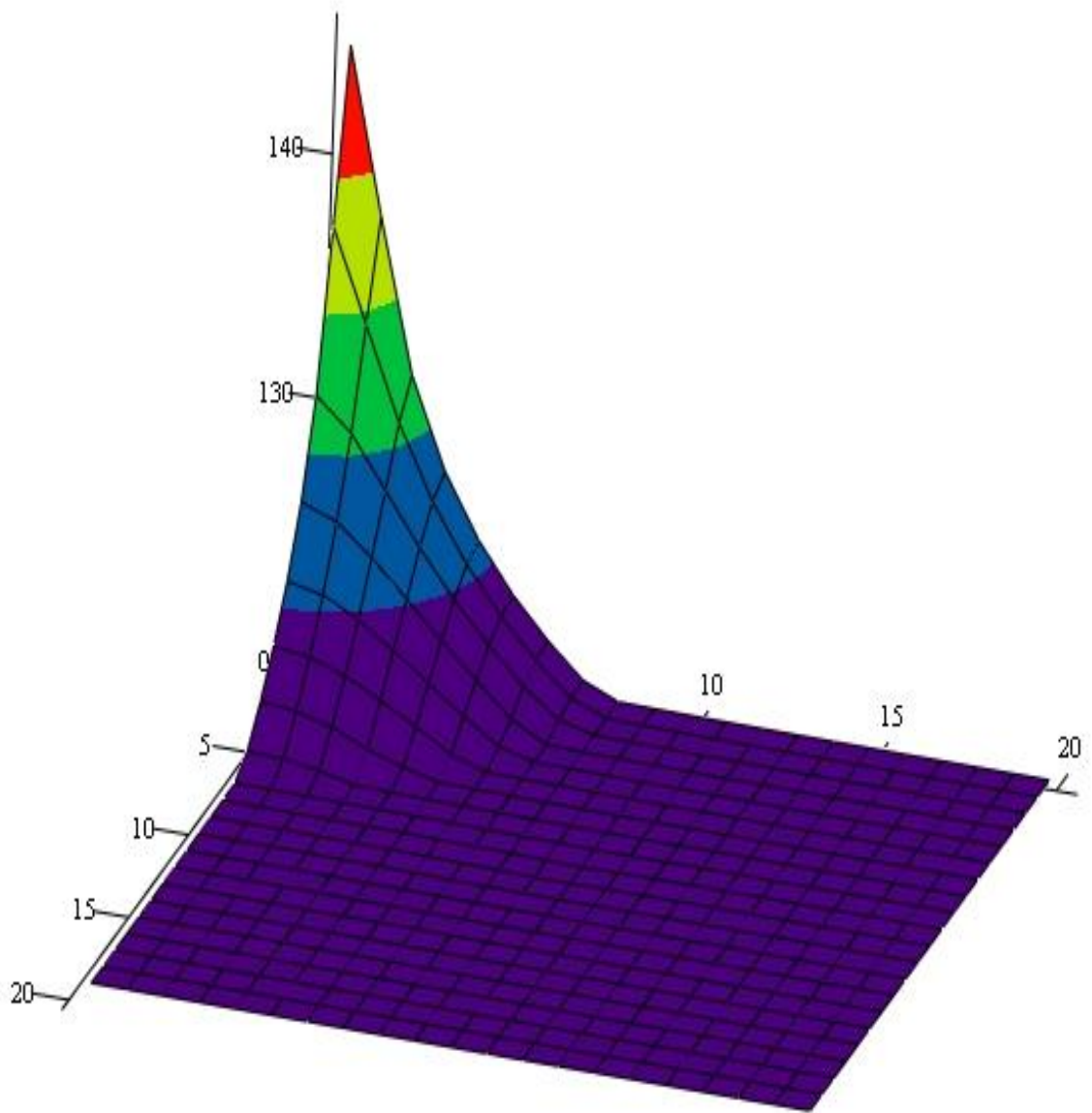


Рис 3.1 Изменение давления для плохопроницаемого пласта в случае совместной разработки.



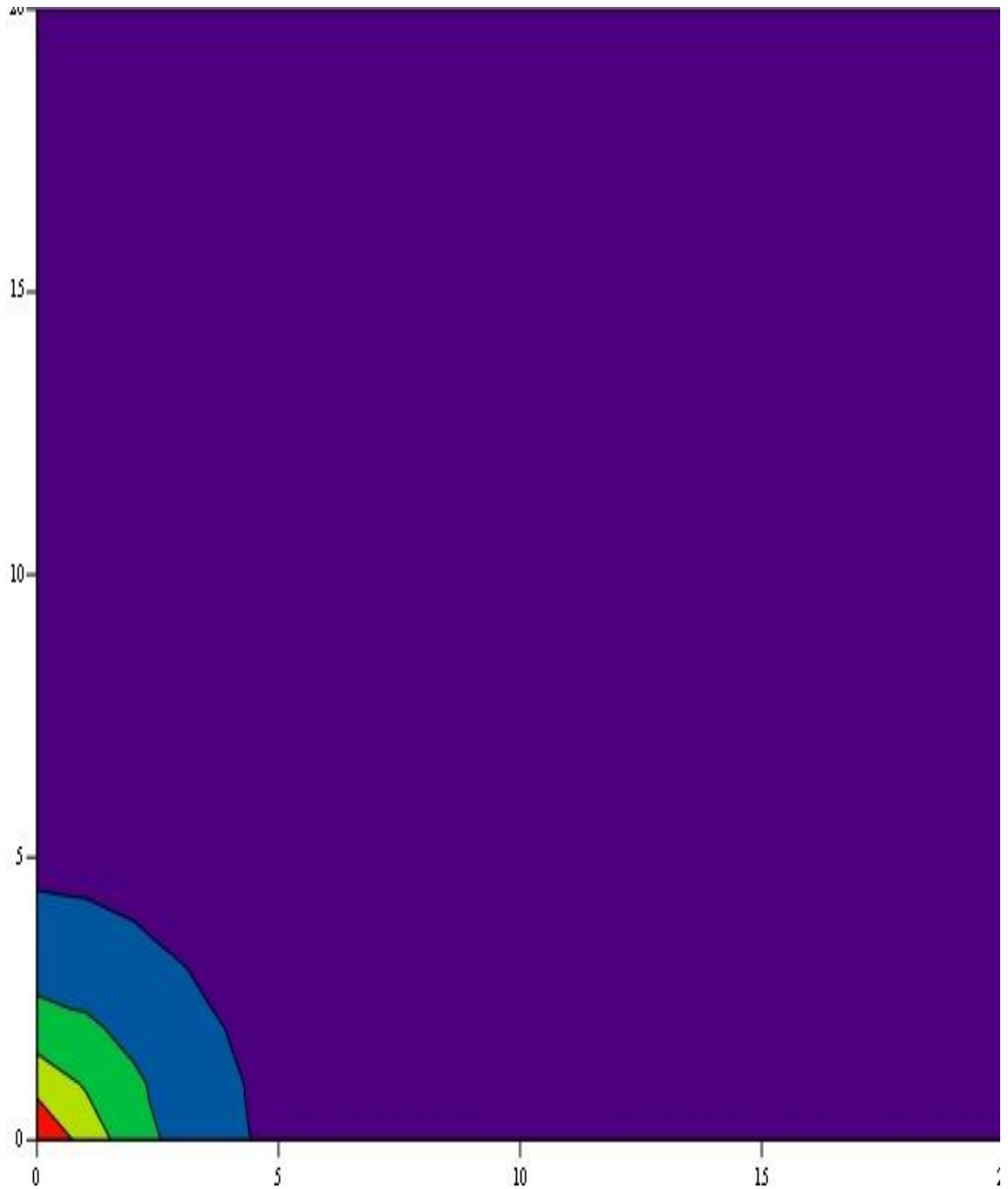


Рис 3.2 Положение изобарической поверхности для плохопроницаемого пласта в случае совместной разработки.

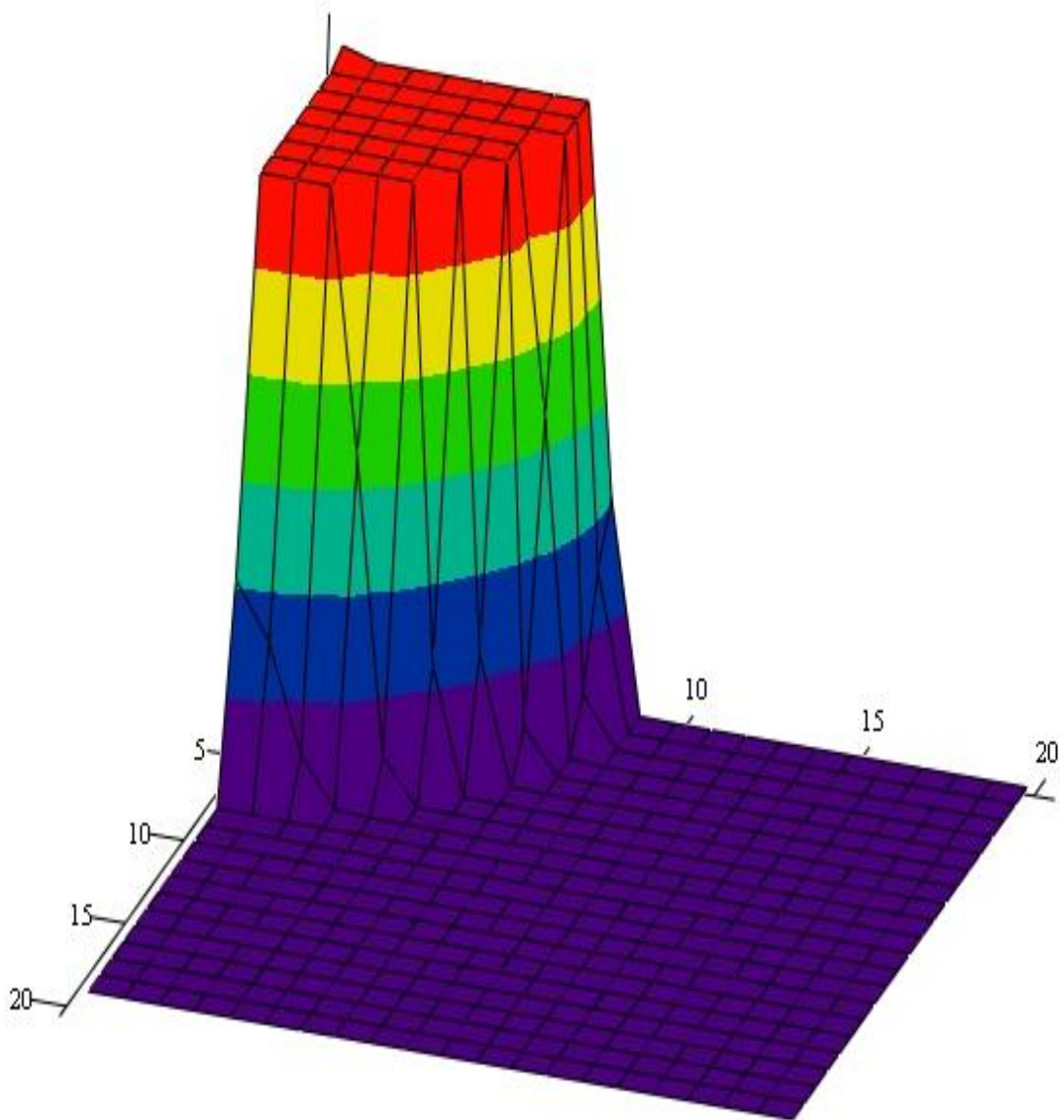


Рис 4.1 Изменение насыщенности для плохопроницаемого пласта в случае совместной разработки.

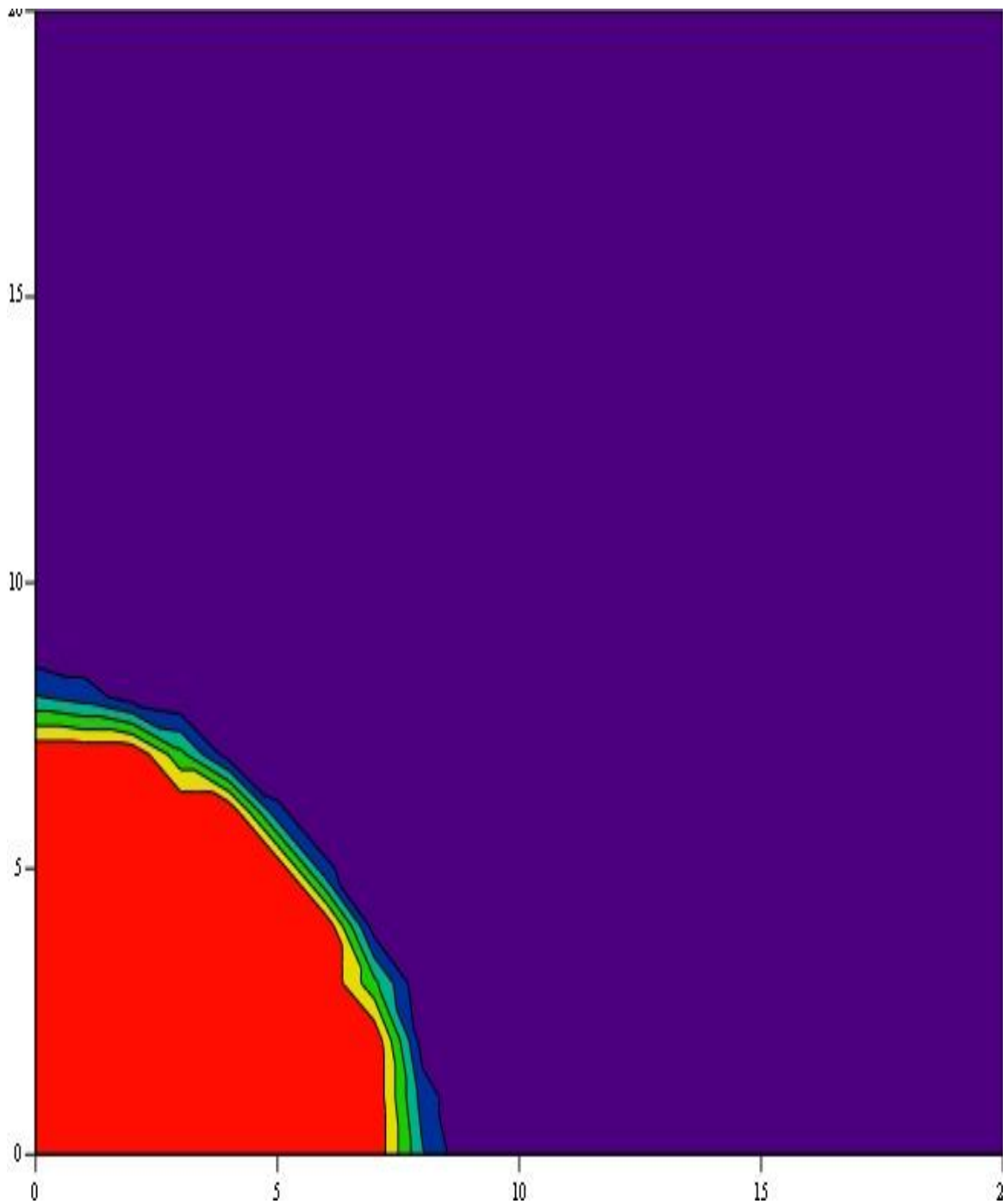


Рис 4.2 Изменение поверхности изосад для плохопроницаемого пласта в случае совместной разработки

Во втором режиме фильтрации водонасыщенность для хорошопроницаемого пласта изменяется медленно. А для плохопроницаемого пласта водонасыщенность изменяется быстрее чем при одновременной закачки. А коэффициент нефтеотдачи при этом монотонно возрастает. Водонефтяной контакт в случае вытеснения нефти из плохопроницаемого пласта достигает через 440 суток. Коэффициент нефтеотдачи в течение 140 дней сохранился почти постоянным. На рис 3.1

показано изменение давления и изобарической поверхности который соответствует 440 суткам разработки. Соответственно на рисунках приведены водонасыщенность и поверхность изосад после 440 суток разработки. Водонасыщенность добывающей скважины в плохопроницаемом пропластке были больше чем водонасыщенности в хорошопроницаемом пропластке. Это связано с перетоками флюида между пропластками.

На рисунках 5.1 – 6.2 показаны изменения давления и насыщенности в пропластке 2 после раздельной разработки 440 сут

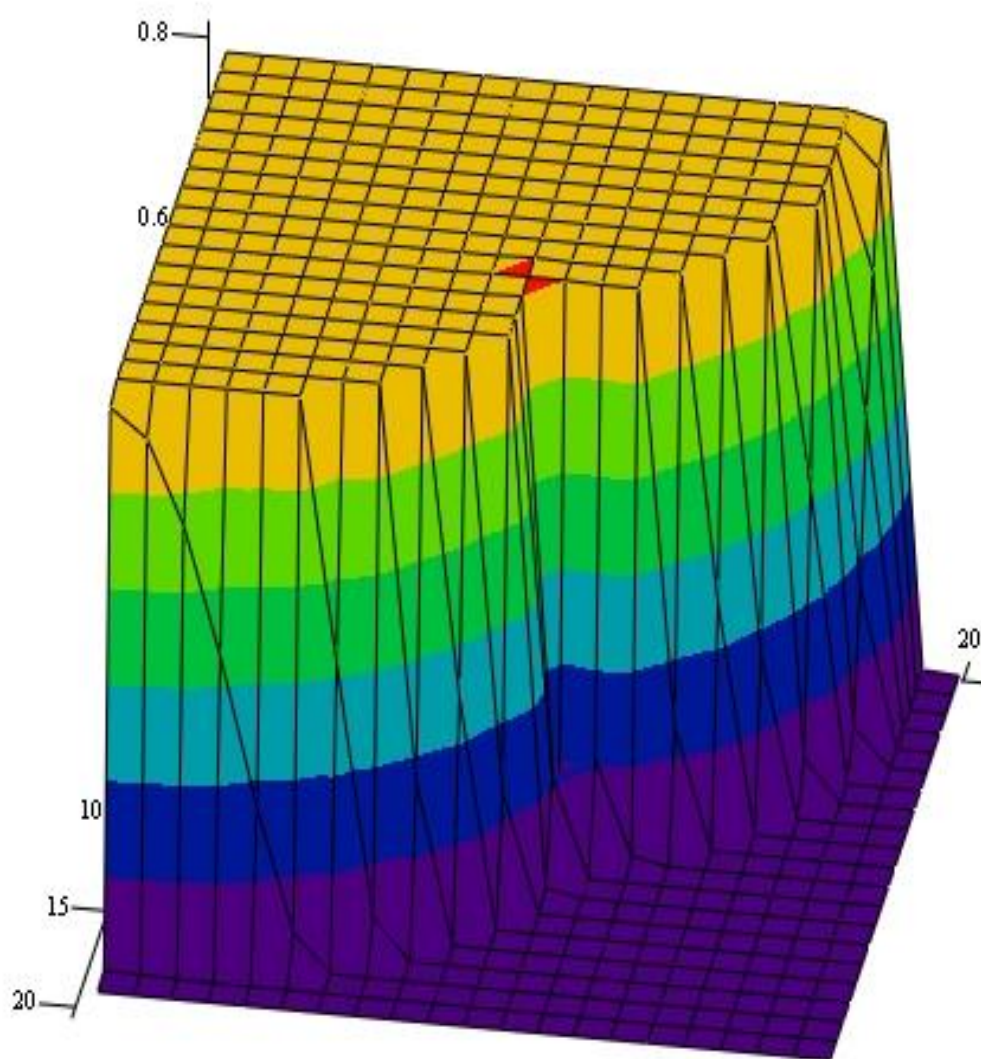


Рис 5.1 Изменение насыщенности для плохопроницаемого пласта в случае раздельной разработки.

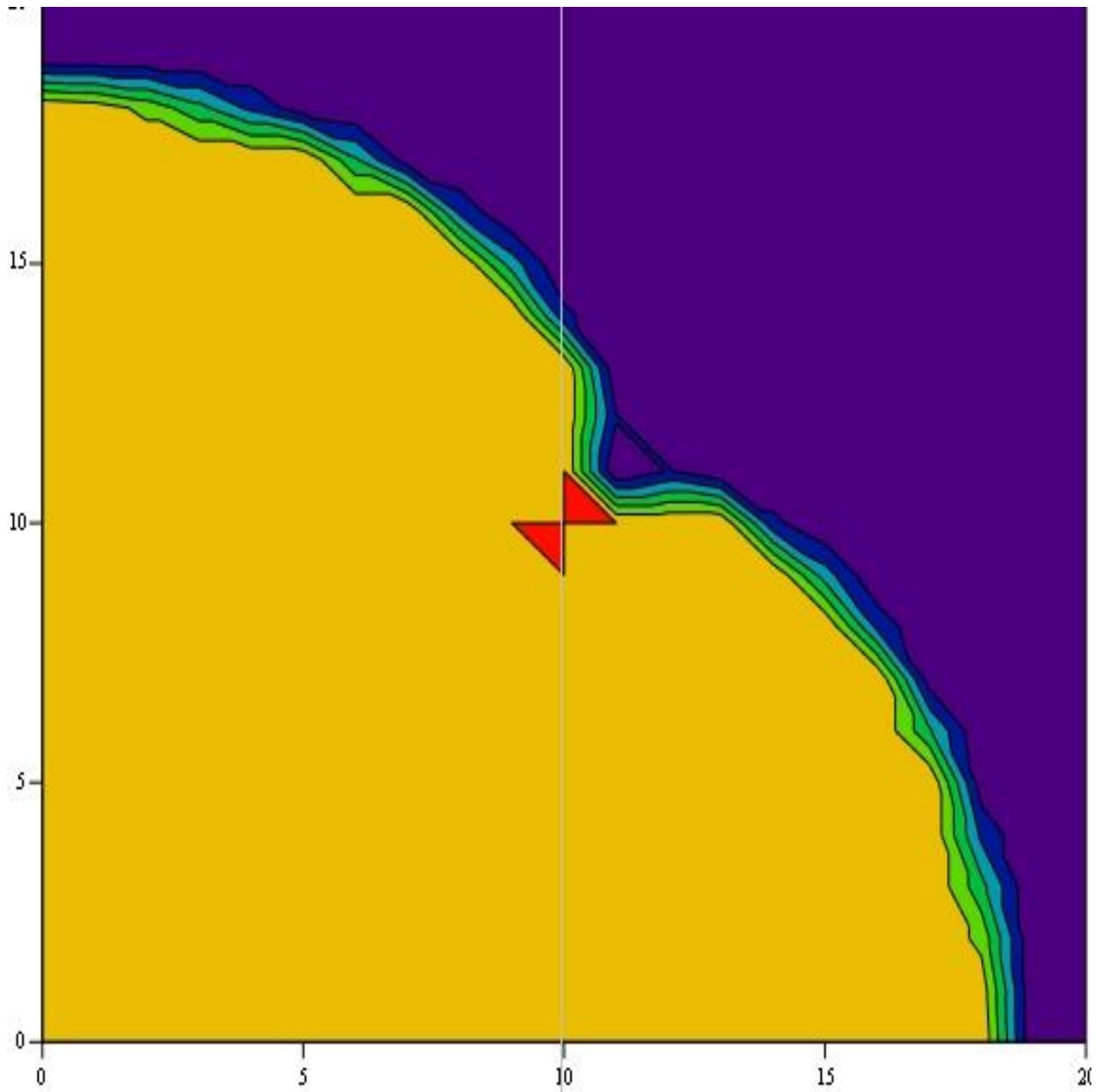


Рис 5.2 Изменение поверхности изосад для плохопроницаемого пласта в случае отдельной разработки

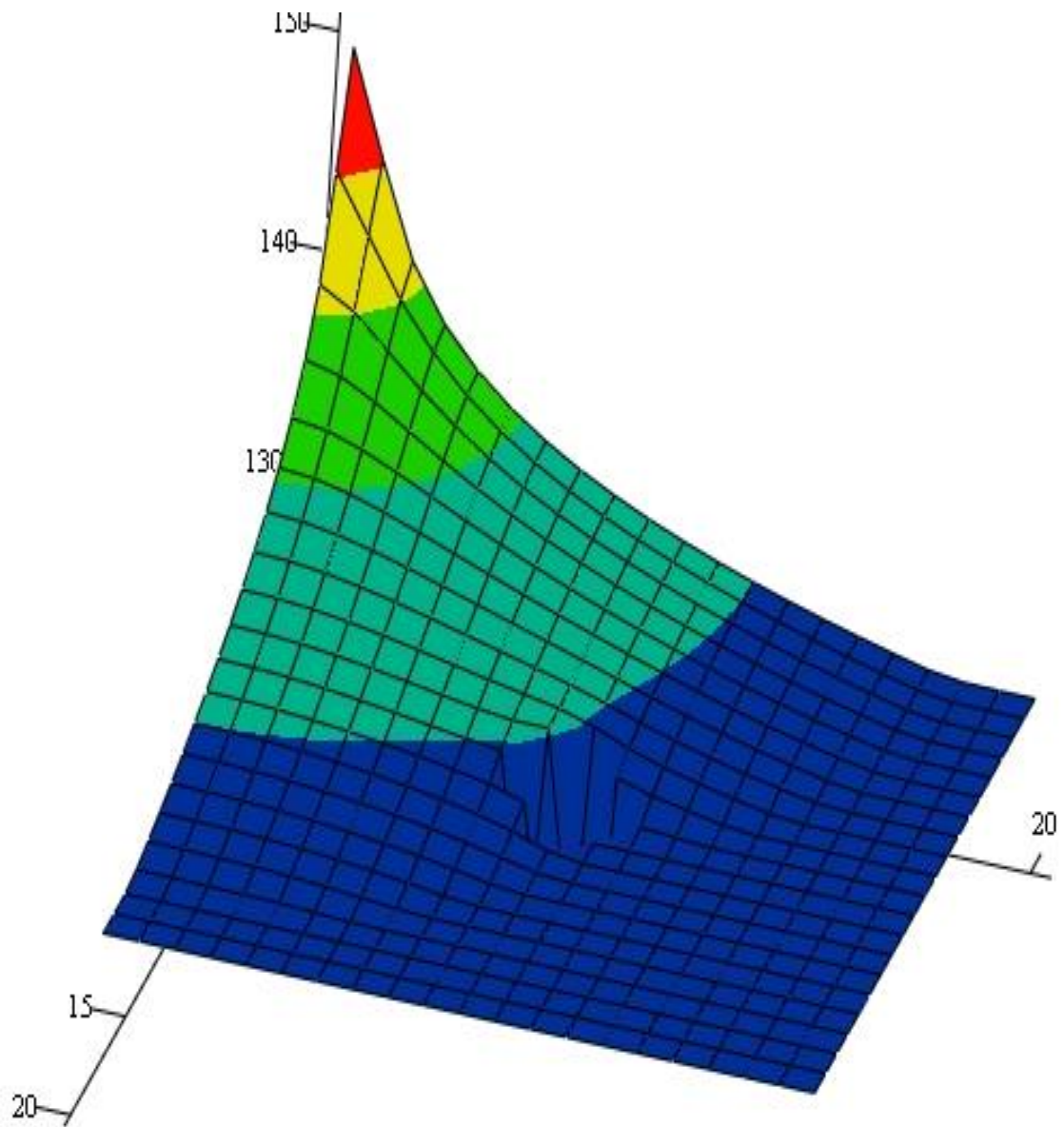


Рис 6.1 Изменение давления для плохопроницаемого пласта в случае  
раздельной разработки.

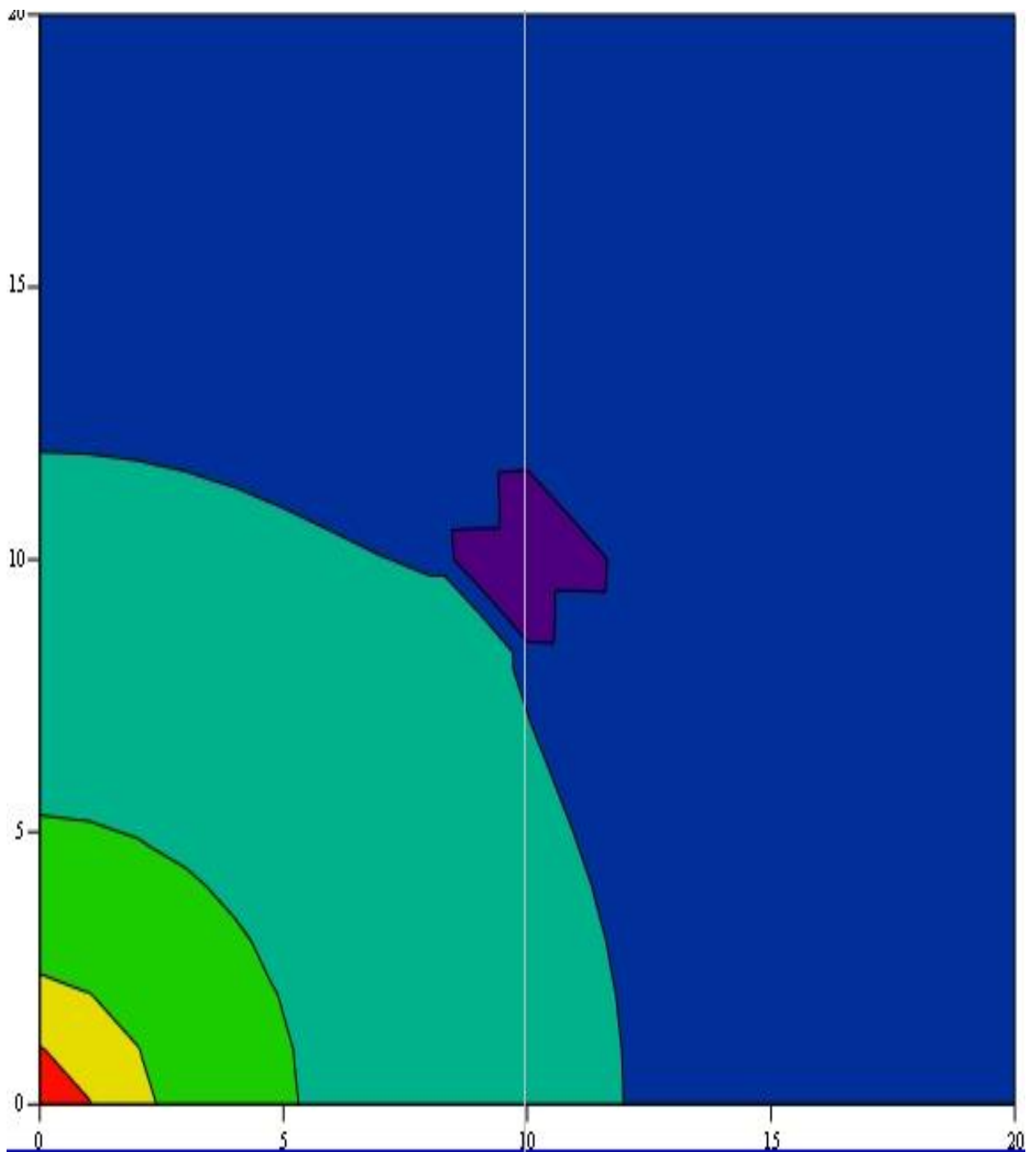


Рис 6.2 Положение изобарической поверхности для плохопроницаемого пласта в случае отдельной разработки.

Математическая модель позволяет определить количество перетекающего флюида между пропластками, а также определить количество нефтяной и водяной фазы в скважинах и коэффициент нефтеотдачи залежей

При совместной разработке пропластков единой системой скважин одним из гидродинамических методов повышения нефтеотдачи является одновременно раздельная эксплуатация (ОРЭ). Метод направлен на обеспечение более равномерного вытеснения нефти из пласта. Однако процесс вытеснения нефти водой во вскрытых скважинами пропластках, разделенных слабопроницаемыми перемычками, еще недостаточно изучен. Исследование такого процесса проведем с помощью вычислительных экспериментов

В замкнутой системе дифференциальных уравнений рассматривается относительно функций давления и насыщенности для двух пластов. Численные методы решения построены методом явных конечно – разностей. Для определения насыщенности и давления применяются итерационные схемы метод Зейделя, при этом функция Баклея – Леверетта рассматриваемой ячейки выбирается с ориентацией и учетом направления основного потока. При таком построении вычислительного алгоритма вычислительный процесс выполняется при  $\varepsilon \approx 10^{-4}, 10^{-5}$ .

Предложенный алгоритм позволяет определить количество перетекающей жидкости в пропластках и коэффициенты нефтеотдачи, а также регулирует процесс вытеснения нефти водой.

Полученные результаты показали, что построенная радиально-кольцевая сетка в окрестности нагнетательных скважин позволяет более точно смоделировать логарифмическую зависимость давления.

В данной работе в зависимости от влияния радиуса скважины построения радиально-кольцевой сетки можно расширить в нашей работе радиально-кольцевая сетка построена для радиуса влияния скважины  $\rho = h$  шаг сетки. При  $\rho = h$  количество итерации уменьшается.

Математическую модель с капиллярной пропиткой двухслойного пласта можно применить для вычисления многослойных пластов. Одновременно можно вычислять количество перетекающей жидкости, таким образом можно оценить массоперенос между пропластками в зависимости от капиллярной пропитки.



## 5. Реализация программы вычислительного алгоритма расчетов на языке C++

### 5.1 Язык программирования C++

Язык программирования C++ представляет собой компилируемый, статически типизированный язык программирования общего назначения.

Поддерживает такие парадигмы программирования, как процедурное программирование, объектно-ориентированное программирование, обобщённое программирование. Язык имеет богатую стандартную библиотеку, которая включает в себя распространённые контейнеры и алгоритмы, ввод-вывод, регулярные выражения, поддержку многопоточности и другие возможности. C++ сочетает свойства как высокоуровневых, так и низкоуровневых языков. В сравнении с его предшественником — языком C, — наибольшее внимание уделено поддержке объектно-ориентированного и обобщённого программирования.

C++ широко используется для разработки программного обеспечения, являясь одним из самых популярных языков программирования. Область его применения включает создание операционных систем, разнообразных прикладных программ, драйверов устройств, приложений для встраиваемых систем, высокопроизводительных серверов, а также развлекательных приложений (игр). Существует множество реализаций языка C++, как бесплатных, так и коммерческих и для различных платформ. Например, на платформе x86 это GCC, Visual C++, Intel C++ Compiler, Embarcadero (Borland) C++ Builder и другие. C++ оказал огромное влияние на другие языки программирования, в первую очередь на Java и C#.

Синтаксис C++ унаследован от языка C. Одним из принципов разработки было сохранение совместимости с C. Тем не менее, C++ не является в строгом смысле надмножеством C; множество программ, которые могут одинаково успешно транслироваться как компиляторами C, так и компиляторами C++, довольно велико, но не включает все возможные программы на C.

Стандартная библиотека C++ включает в себя набор средств, которые должны быть доступны для любой реализации языка, чтобы обеспечить программистам удобное пользование языковыми средствами и создать базу для разработки как прикладных приложений самого широкого спектра, так и специализированных библиотек. Стандартная библиотека

C++ включает в себя часть стандартной библиотеки C. Стандарт C++ содержит нормативную ссылку на стандарт C от 1990 года и не определяет самостоятельно те функции стандартной библиотеки, которые заимствуются из стандартной библиотеки C.

Доступ к возможностям стандартной библиотеки C++ обеспечивается с помощью включения в программу (посредством директивы #include) соответствующих стандартных заголовочных файлов. Всего в стандарте C++11 определено 79 таких файлов. Средства стандартной библиотеки объявляются как входящие в пространство имён std. Заголовочные файлы, имена которых соответствуют шаблону «cX», где X — имя заголовочного файла стандартной библиотеки C без расширения (cstdlib, cstring, cstdio и пр.), содержат объявления, соответствующие данной части стандартной библиотеки C.

## 5.2 Программный код

```
program twuplast
  dimension pcc(-1:21,-1:21),pnn(0:20,0:20)
  dimension scc(-1:21,-1:21),snn(-1:21,-1:21)
    dimension pcc2(-1:21,-1:21),pnn2(0:20,0:20)
  dimension scc2(-1:21,-1:21),snn2(-1:21,-1:21)
  real por,tau,stau,h,hx,hy,lx,ly,muw,muo,m0
  real rck,pnag,pdob,scw,sww,prk,eta,etax,etay,qdob
  real qoil,sqoil,qwatr,sqwatr,qckv,s1,vvi,fbl_s
  integer nx,ny,nxp,nyp,nxl,nyl,stzz,szz,skk
  integer nxck,nyck,nxckl,nxckp,nyckn,nyckv
  external fwar,foil,fwar2,foil2
  common /com1/
por,prk,prk2,prkpp,hp,muw,muo,m0,pi,h,h2,rck,scw,sww,pdob,pnag,phag2
  open(7,file='result.PRN')
  sum=0.0
  sum2=0.0
  pi=3.1415
  pdob=120
  pnag=150
  pnag2=145
!*Координаты добывающей скважины (nxck,nyck)
  nxck=10
  nyck=10
  nxckl=nxck-1
  nxckp=nxck+1
  nyckn=nyck-1
```

```

    нускv=нуск+1
!*связан.вода (scw)
    scw=0.2
    sww=0.8
    por=0.3
    rck=15
    lx=4e4
    ly=4e4
    h=1000
    h2=600
    hp=100
    hx=2e3
    hy=2e3
    nx=20
    ny=20
    nxl=nx-1
    nyl=ny-1
    nxp=nx+1
    nyp=ny+1
    tau=120
    stau=0
    muw=1
    muo=3
    m0=muw/muo
    prk=0.5
    prk2=0.1
    prkpp=1e-5
    sqoil=0.0
!* Координаты нагнетательной скважины pnag(0,0)
!* Координаты добывающей скважины pdob(10,10)
    sqwatr=0.0
    do 1 i=0,nx
    do 1 j=0,ny
    scc(i,j)=scw+0.0001
    scc2(i,j)=scw+0.0001
    snn2(i,j)=scw+0.0001
1 continue
    scc(0,0)=sww
    scc(nxck,nyck)=scw
    scc(nxck,nyck)=scw+0.0001
    scc2(0,0)=sww
    scc2(nxck,nyck)=scw
    scc2(nxck,nyck)=scw+0.0001
do 2 i=0,nx

```

```

        do 2 j=0,ny
            pcc(i,j)=120
            pnn(i,j)=120
            pcc2(i,j)=120
            pnn2(i,j)=120
2        continue
            do 3 i=0,nx
                pcc(i,-1)=pcc(i,1)
                pcc(i,nyp)=pcc(i,nyl)
                pcc2(i,-1)=pcc2(i,1)
                pcc2(i,nyp)=pcc2(i,nyl)
3            continue
            do 4 j=0,ny
                pcc(-1,j)=pcc(1,j)
                pcc(nxp,j)=pcc(nxl,j)
                pcc2(-1,j)=pcc2(1,j)
                pcc2(nxp,j)=pcc2(nxl,j)
4            continue
                pcc(0,0)=pnag
                pcc(nxck,nyck)=pdob
                pcc2(0,0)=pnag2
                pcc2(nxck,nyck)=pdob
                stzz=50000
                szz=1000
                skk=0
                qckv=0
                !*Всего расчетных временных слоев(stzz); Печать результатов через
слоев(szz)
                !* ss-число итерации по давлению
55         stau=stau+tau
                call davl(nx,ny,nxck,nyck,hx,hy,snn2,scc,pcc2,pcc,pnn,qckv)
                s1=scc(nxck,nyck)
                vvi=(fwar(s1,scw)+m0*foil(s1,sww))/muw
                fbl_s=fwar(s1,scw)/vvi
                qwatr=fbl_s*qckv
                !* write(*,*) qwatr
                qoil=qckv-qwatr
                pcc(0,0)=pnag
                pcc(nxck,nyck)=pdob
                scc(0,0)=sww
                !* scc(nxck,nyck)=scw
                call
nachen(nx,ny,nxck,nyck,hx,hy,tau,snn2,scc,pnn2,pcc,snn,qdob,qflu)
        do 9 i=0,nx

```

```

        do 9 j=0,ny
            pnn(i,j)=pcc(i,j)
9        continue
        do 10 i=0,nx
            snn(i,-1)=snn(i,1)
            snn(i,nyp)=snn(i,nyl)
10       continue
        do 11 j=0,ny
            snn(-1,j)=snn(1,j)
            snn(nxp,j)=snn(nxl,j)
11       continue
        call davl2(nx,ny,nxck,nyck,hx,hy,snn,scc2,pcc,pcc2,pnn2,qckv)
            s2=scc(nxck,nyck)
            vvi=(fwar(s2,scw)+m0*foil(s2,sww))/muw
            fbl_s=fwar(s2,scw)/vvi
            qwatr2=fbl_s*qckv
            qoil2=qckv-qwatr2
!*****
            pcc2(0,0)=pnag2
            pcc(nxck,nyck)=pdob
            scc2(0,0)=sww
!*       scc(nxck,nyck)=scw
            call
nachen2(nx,ny,nxck,nyck,hx,hy,tau,snn,scc2,pcc2,pcc,snn2,qdob,qflu2)
        do i=0,nx
            do j=0,ny
                scc(i,j)=snn(i,j)
                pnn(i,j)=pcc(i,j)
                scc2(i,j)=snn2(i,j)
                pnn2(i,j)=pcc2(i,j)
            enddo
        enddo
        do i=0,nx
            scc(i,-1)=snn(i,1)
            scc(i,nyp)=snn(i,nyl)
            scc2(i,-1)=snn2(i,1)
            scc2(i,nyp)=snn2(i,nyl)
        enddo
        do j=0,ny
            scc(-1,j)=snn(1,j)
            scc(nxp,j)=snn(nxl,j)
            scc2(-1,j)=snn2(1,j)
            scc2(nxp,j)=snn2(nxl,j)
        enddo

```

```

        sum=sum+qflu
        sum2=sum2+qflu2
!*koefficient nefteotdachy (csw-pogrebennia voda;(1-csw)-udelni
geologichecki zapac)
        eta=0.0
        eta2=0.0
        do 12 i=1,nx-1
        do 12 j=1,ny-1
        eta=eta+0.25*scc(i,j)
        eta2=eta2+0.25*scc2(i,j)
12 continue
        etay=0.0
        etay2=0.0
        do 13 i=0,nx
        etay=etay+0.5*scc(i,0)+0.5*scc(i,ny)
        etay2=etay2+0.5*scc2(i,0)+0.5*scc2(i,ny)
13 continue
        etax=0.0
        do 14 j=0,ny
        etax=etax+0.5*scc(0,j)+0.5*scc(nx,j)
        etax2=etax2+0.5*scc2(0,j)+0.5*scc2(nx,j)
14 continue
        eta=(4*hx*hy*(eta+etax+etay)/lx/ly-scw)/(1-scw)
        qtek=qoil
!* if(skk.eq.0) qoil=qoil/2
!* if(skk.eq.stzz) qoil=qoil/2
!* if(skk.eq.0) qwatr=qwatr/2
!* if(skk.eq.stzz) qwatr=qwatr/2
        sqoil=sqoil+qoil
        sqwatr=sqwatr+qwatr
        eta2=(4*hx*hy*(eta2+etax2+etay2)/lx/ly-scw)/(1-scw)
        qtek2=qoil2
        sqoil2=sqoil2+qoil2
        sqwatr2=sqwatr2+qwatr2
!*****
        skk=skk+1
        if(skk.le.szz) go to 55
        szz=szz+1000
        write(7,100) stau,prkpp
        write(7,90) eta,qoil,sqoil*tau,qwatr,sqwatr*tau,qflu*tau,qflu2*tau
        write(7,91)
        write(7,88)((pcc(i,j),i=0,nx),j=0,ny)
        write(7,92)
        write(7,89)((scc(i,j),j=0,ny),i=0,nx)

```

```

        write(7,90)
eta2,qoil2,sqoil2*tau,qwatr2,sqwatr2*tau,qflu*tau,qflu2*tau
        write(7,911)
        write(7,88)((pcc2(i,j),i=0,nx),j=0,ny)
        write(7,921)
        write(7,89)((scc2(i,j),j=0,ny),i=0,nx)
        if(skk.lt.stzz) go to 55
    100      format('Время разработки: T=',e11.5/'Проницаемость
перемычки КП=',e11.5)
    88      format(21(f7.3,1x))
    89      format(21(f7.5,1x))
    90      format('Коэффициент нефтеотдачи:',e11.5/'Текущ.нефтяная
фаза qn(&
        cm3/c.)=',e11.5/'Отбир. нефть с одной скв. Qn(см3/c.)=',e11.5/&
        'Текущ.водяная фаза qv(см3/c.)=',e12.6/'Отбир.вода с одной
скв.Qv&
        (см3/c.)',e11.5/'Количество перетока в пласт 1-
Q(см3/c.)=',e11.5/'K&
        оличество перетока в пласт 2-Q(см3/c.)=',e11.5)
    91      format(' Пласт 1: Изменения поля давления P(x,y,t):')
    92      format(' Пласт 1: Изменения поля насыщенностей воды
S(x,y,t):')
    911     format(' Пласт 2: Изменения поля давления P(x,y,t):')
    921     format(' Пласт 2: Изменения поля насыщенностей воды
S(x,y,t):')
    99      stop
        end
        subroutine davl(nx,ny,nxck,nyck,hx,hy,snn2,scc,pcc2,pcc,pnn,qckv)
        dimension pcc(-1:21,-1:21),pnn(0:20,0:20),scc(-1:21,-1:21),cigm(-
1:21,-1:21),pcc2(0:20,0:20),snn2(-1:21,-1:21)
        real hx,hy,pdob,pnag,lgr,vi,vj,vip,vjp,af,xp,rp,eps
        real sij,sil,sip,sjl,sjp,uij,upl,unag,udob,una,udo,qckv
        integer nx,ny,nxl,nxp,nyl,nyp,i,j,ss
        integer nxck,nyck,nxckl,nxckp,nyckn,nyckv
        external fwar,foil,fwar2,foil2
        common /com1/
por,prk,prk2,prkpp,hp,muw,muo,m0,pi,h,h2,rck,scw,sww,pdob,pnag,pnag2
        gdrpv(uij,upl)=2*uij*upl/(uij+upl)
        lgr=log(0.2*hx/rck)
        eps=1e-4
        ss=0
        nxckl=nxck-1
        nxckp=nxck+1
        nyckn=nyck-1

```

```

nyckv=nyck+1
nxl=nx-1
nyl=ny-1
nxp=nx+1
nyp=ny+1
do 1 i=0,nx
do 1 j=0,ny
sij=scc(i,j)
cigm(i,j)=prk*h*(fwar(sij,scw)+m0*foil(sij,sww))/muw
pnn(i,j)=pcc(i,j)
1 continue
do 2 i=0,nx
cigm(i,-1)=cigm(i,1)
cigm(i,nyp)=cigm(i,nyl)
2 continue
do 3 j=0,ny
cigm(-1,j)=cigm(1,j)
cigm(nxp,j)=cigm(nxl,j)
3 continue
4 ss=ss+1
af=0
pcc(0,0)=pnag
pcc(nxck,nyck)=pdob
do 7 i=0,nx
do 7 j=0,ny
sij=cigm(i,j)
sil=cigm(i-1,j)
sip=cigm(i+1,j)
sjl=cigm(i,j-1)
sjp=cigm(i,j+1)
vip=(gdrpv(sij,sil)*pcc(i-1,j)/hx+gdrpv(sij,sip)*pcc(i+1,j)/hx)/hx
vjp=(gdrpv(sij,sjl)*pcc(i,j-1)/hy+gdrpv(sij,sjp)*pcc(i,j+1)/hy)/hy
unag=0
if(i.eq.0.and.j.eq.0) unag=2*pi*scc(0,0)*pnag/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.0.and.j.eq.1) unag=2*pi*scc(0,1)*pnag/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.1.and.j.eq.0) unag=2*pi*scc(1,0)*pnag/(hx*hy*lgr)
udob=0
if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck)
udob=2*pi*scc(nxck,nyck)*pdob/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyckv)
udob=2*pi*scc(nxck,nyckv)*pdob/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyckn)
udob=2*pi*scc(nxck,nyckn)*pdob/(hx*hy*lgr)

```



```

        if(i.eq.nxckl.and.j.eq.nyck)
udob=2*pi*scc(nxckl,nyck)*pdob/(hx*hy*lgr)
        if(i.eq.nxckp.and.j.eq.nyck)
udob=2*pi*scc(nxckp,nyck)*pdob/(hx*hy*lgr)
    !*pravaia chact
        vi=(gdrpv(sij,sil)/hx+gdrpv(sij,sip)/hx)/hx
        vj=(gdrpv(sij,sjl)/hy+gdrpv(sij,sjp)/hy)/hy
        una=0
        if(i.eq.0.and.j.eq.0) una=2*pi*scc(0,0)/(hx*hy*lgr)
        if(i.eq.0.and.j.eq.1) una=2*pi*scc(0,1)/(hx*hy*lgr)
        if(i.eq.1.and.j.eq.0) una=2*pi*scc(1,0)/(hx*hy*lgr)
        udo=0
        if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck) udo=2*pi*scc(nxck,nyck)/(hx*hy*lgr)
        if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyckv) udo=2*pi*scc(nxck,nyckv)/(hx*hy*lgr)
        if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyckn) udo=2*pi*scc(nxck,nyckn)/(hx*hy*lgr)
        if(i.eq.nxckl.and.j.eq.nyck) udo=2*pi*scc(nxckl,nyck)/(hx*hy*lgr)
        if(i.eq.nxckp.and.j.eq.nyck) udo=2*pi*scc(nxckp,nyck)/(hx*hy*lgr)
!***** Peretok
        sz1=scc(i,j)
        sz2=snn2(i,j)
        prtok=prkpp*(fwar(sz1,scw)+m0*foil(sz1,sww))/(hp*muw)
        if(pcc(i,j).lt.pcc2(i,j))
prtok=prkpp*(fwar2(sz2,scw)+m0*foil2(sz2,sww))/(hp*muw)
        if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck) prtoc=0.0
        if(i.eq.0.and.j.eq.0) prtoc=0.0
        xp=(vip+vpj+unag+udob+prtoc*pcc2(i,j))/(vi+vj+una+udo+prtoc)
        rp=abs(xp-pnn(i,j))
        if(rp-af) 6,6,5
5  af=rp
6  pcc(i,j)=xp
   pnn(i,j)=xp
7  continue
   do 8 i=0,nx
       pcc(i,-1)=pcc(i,1)
       pcc(i,nyp)=pcc(i,nyl)
8  continue
   do 9 j=0,ny
       pcc(-1,j)=pcc(1,j)
       pcc(nxp,j)=pcc(nxl,j)
9  continue
!*  write(*,*) ss
   if(af-eps) 10,10,4
10
rp=pcc(nxckl,nyck)+pcc(nxckp,nyck)+pcc(nxck,nyckn)+pcc(nxck,nyckv)

```

```

qckv=2*pi*cigm(nxck,nyck)*(rp/4-pdob)/lgr
return
end
subroutine
nachen(nx,ny,nxck,nyck,hx,hy,tau,snn2,scc,pnn2,pcc,snn,qdob,qflu)
dimension scc(-1:21,-1:21),pcc(-1:21,-1:21),snn(-1:21,-1:21)
dimension cigm(-1:21,-1:21),fbls(-1:21,-1:21),pnn2(0:20,0:20),snn2(-
1:21,-1:21)
real hx,hy,pdob,lgr,vi,vip,vjp,ucp,qdob
real sij,sil,sip,sjl,sjp,uij,upl,uqdob
real tau,vxp,vxl,vyp,vyl,qnag,uqnag
integer nx,ny,nxl,nxp,nyl,nyp,i,j,ip,il,jv,jn
integer nxck,nyck,nxckl,nxckp,nyckn,nyckv
external fwar,foil,fwar2,foil2
common /com1/
por,prk,prk2,prkpp,hp,muw,muo,m0,pi,h,h2,rck,scw,sww,pdob,pnag,pnag2
gdrpv(uij,upl)=2*uij*upl/(uij+upl)
lgr=log(0.2*hx/rck)
nxckl=nxck-1
nxckp=nxck+1
nyckn=nyck-1
nyckv=nyck+1
nxl=nx-1
nyl=ny-1
nxp=nx+1
nyp=ny+1
do 1 i=0,nx
do 1 j=0,ny
sij=scc(i,j)
vi=(fwar(sij,scw)+m0*foil(sij,sww))/muw
cigm(i,j)=prk*h*vi
fbls(i,j)=fwar(sij,scw)/vi
1 continue
do 2 i=0,nx
cigm(i,-1)=cigm(i,1)
cigm(i,nyp)=cigm(i,nyl)
fbls(i,-1)=fbls(i,1)
fbls(i,nyp)=fbls(i,nyl)
2 continue
do 3 j=0,ny
cigm(-1,j)=cigm(1,j)
cigm(nxp,j)=cigm(nxl,j)
fbls(-1,j)=fbls(1,j)
fbls(nxp,j)=fbls(nxl,j)

```

```

3  continue
do 4 i=0,nx
do 4 j=0,ny
  sij=cigm(i,j)
  sil=cigm(i-1,j)
  sip=cigm(i+1,j)
  sjl=cigm(i,j-1)
  sjp=cigm(i,j+1)
  vxp=-gdrpv(sij,sip)*(pcc(i+1,j)-pcc(i,j))/hx
  vxl=-gdrpv(sij,sil)*(pcc(i,j)-pcc(i-1,j))/hx
  vyp=-gdrpv(sij,sjp)*(pcc(i,j+1)-pcc(i,j))/hy
  vyl=-gdrpv(sij,sjl)*(pcc(i,j)-pcc(i,j-1))/hy
  ip=0
  if(pcc(i+1,j).gt.pcc(i,j)) ip=1
  il=0
  if(pcc(i-1,j).gt.pcc(i,j)) il=1
  jv=0
  if(pcc(i,j+1).gt.pcc(i,j)) jv=1
  jn=0
  if(pcc(i,j-1).gt.pcc(i,j)) jn=1
  vip=(vxp*fbls(i+ip,j)-vxl*fbls(i-il,j))/hx
  vjp=(vyp*fbls(i,j+jv)-vyl*fbls(i,j-jn))/hy
  ucp=(pcc(nxck,nyckn)+pcc(nxck,nyckv)+pcc(nxckl,nyck)+pcc(nxckp
,nyck))/4
  !*  ucp=pnn(nxck,nyck)
      qdob=2*pi*cigm(nxck,nyck)*(ucp-pdob)*fbls(nxck,nyck)/lgr
      uqdob=0
      if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck) uqdob=qdob
      qnag=2*pi*cigm(0,0)*(pcc(0,0)-pnag)*fbls(nxck,nyck)/lgr
      uqnag=0
      if(i.eq.0.and.j.eq.0) uqnag=qnag
  !*****Peretok
      sz1=scc(i,j)
      sz2=snn2(i,j)
      prtok=prkpp*(fwar(sz1,scw)+m0*foil(sz1,sww))/(hp*muw)
      if(pcc(i,j).lt.pnn2(i,j))
prtok=prkpp*(fwar2(sz2,scw)+m0*foil2(sz2,sww))/(hp*muw)
      if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck) prtoc=0.0
      if(i.eq.0.and.j.eq.0) prtoc=0.0
      snn(i,j)=scc(i,j)-tau*(vip+vjp+prtoc*(pcc(i,j)-
pnn2(i,j))+uqnag/hx/hy+uqdob/hx/hy)/por/h
4  continue
do 5 i=0,nx
  snn(i,-1)=snn(i,1)

```

```

        snn(i,nyp)=snn(i,nyl)
5  continue
    do 6 j=0,ny
        snn(-1,j)=snn(1,j)
        snn(nxp,j)=snn(nyl,j)
6  continue
    sum=0.0
    do i=1,nx
        do j=1,ny
            sz2=snn2(i,j)
            prtok=prkpp*(fwar2(sz2,scw)+m0*foil2(sz2,sww))/(hp*muw)*(pcc
(i,j)-pnn2(i,j))
            if(pcc(i,j).gt.pnn2(i,j)) prtok=0.0
            if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck) prtok=0.0
            sum=sum+abs(prtok)
        enddo
    enddo
    qflu=sum*hx*hy
    return
end
subroutine
davl2(nx,ny,nxck,nyck,hx,hy,snn,scc2,pcc,pcc2,pnn2,qckv)
    dimension  pcc2(-1:21,-1:21),snn(-1:21,-1:21),pcc(-1:21,-1:21),cigm(-
1:21,-1:21),pnn2(0:20,0:20),scc2(-1:21,-1:21)
    real hx,hy,pdob,pnag,lgr,vi,vj,vip,vjp,af,xp,rp,eps
    real sij,sil,sip,sjl,sjp,uij,upl,unag,udob,una,udo,qckv
    integer nx,ny,nxl,nxp,nyl,nyp,i,j,ss
    integer      nxck,nyck,nxckl,nxckp,nyckn,nyckv
    external fwar,foil,fwar2,foil2
    common
                                                                    /com1/
por,prk,prk2,prkpp,hp,muw,muo,m0,pi,h,h2,rck,scw,sww,pdob,pnag,pnag2
    gdrpv(uij,upl)=2*uij*upl/(uij+upl)
    lgr=log(0.2*hx/rck)
    eps=1e-4
    ss=0
    nxckl=nxck-1
    nxckp=nxck+1
    nyckn=nyck-1
    nyckv=nyck+1
nxl=nx-1
    nyl=ny-1
    nxp=nx+1
    nyp=ny+1
    do 1 i=0,nx

```

```

do 1 j=0,ny
sij=scc2(i,j)
cigm(i,j)=prk2*h*(fwar(sij,scw)+m0*foil(sij,sww))/muw
pnn2(i,j)=pcc2(i,j)
1 continue
do 2 i=0,nx
cigm(i,-1)=cigm(i,1)
cigm(i,nyp)=cigm(i,nyl)
2 continue
do 3 j=0,ny
cigm(-1,j)=cigm(1,j)
cigm(nxp,j)=cigm(nxl,j)
3 continue
4 ss=ss+1
af=0
pcc2(0,0)=pnag2
pcc2(nxck,nyck)=pdob
do 7 i=0,nx
do 7 j=0,ny
sij=cigm(i,j)
sil=cigm(i-1,j)
sip=cigm(i+1,j)
sjl=cigm(i,j-1)
sjp=cigm(i,j+1)
vip=(gdrpv(sij,sil)*pcc2(i-1,j)/hx+gdrpv(sij,sip)*pcc2(i+1,j)/hx)/hx
vjp=(gdrpv(sij,sjl)*pcc2(i,j-1)/hy+gdrpv(sij,sjp)*pcc2(i,j+1)/hy)/hy
unag=0
if(i.eq.0.and.j.eq.0) unag=2*pi*scc2(0,0)*pnag/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.0.and.j.eq.1) unag=2*pi*scc2(0,1)*pnag/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.1.and.j.eq.0) unag=2*pi*scc2(1,0)*pnag/(hx*hy*lgr)
udob=0
if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck)
udob=2*pi*scc2(nxck,nyck)*pdob/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyckv)
udob=2*pi*scc2(nxck,nyckv)*pdob/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyckn)
udob=2*pi*scc2(nxck,nyckn)*pdob/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.nxckl.and.j.eq.nyck)
udob=2*pi*scc2(nxckl,nyck)*pdob/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.nxckp.and.j.eq.nyck)
udob=2*pi*scc2(nxckp,nyck)*pdob/(hx*hy*lgr)
!*pravaia chact
vi=(gdrpv(sij,sil)/hx+gdrpv(sij,sip)/hx)/hx
vj=(gdrpv(sij,sjl)/hy+gdrpv(sij,sjp)/hy)/hy

```

```

una=0
if(i.eq.0.and.j.eq.0) una=2*pi*scc2(0,0)/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.0.and.j.eq.1) una=2*pi*scc2(0,1)/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.1.and.j.eq.0) una=2*pi*scc2(1,0)/(hx*hy*lgr)
udo=0
if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck) udo=2*pi*scc2(nxck,nyck)/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyckv) udo=2*pi*scc2(nxck,nyckv)/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyckn) udo=2*pi*scc2(nxck,nyckn)/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.nxckl.and.j.eq.nyck) udo=2*pi*scc2(nxckl,nyck)/(hx*hy*lgr)
if(i.eq.nxckp.and.j.eq.nyck) udo=2*pi*scc2(nxckp,nyck)/(hx*hy*lgr)
!***** Peretok
sz1=scc2(i,j)
sz2=snn(i,j)
prtok=prkpp*(fwar(sz1,scw)+m0*foil(sz1,sww))/(hp*muw)
if(pcc2(i,j).lt.pcc(i,j))
prtok=prkpp*(fwar(sz2,scw)+m0*foil(sz2,sww))/(hp*muw)
if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck) prtoc=0.0
if(i.eq.0.and.j.eq.0) prtoc=0.0
xp=(vip+vjp+unag+udob+prtoc*pcc(i,j))/(vi+vj+una+udo+prtoc)
rp=abs(xp-pnn2(i,j))
if(rp-af) 6,6,5
5 af=rp
6 pcc2(i,j)=xp
pnn2(i,j)=xp
7 continue
do 8 i=0,nx
pcc2(i,-1)=pcc2(i,1)
pcc2(i,nyp)=pcc2(i,nyl)
8 continue
do 9 j=0,ny
pcc2(-1,j)=pcc2(1,j)
pcc2(nxp,j)=pcc2(nxl,j)
9 continue
!* write(*,*) 'ss',ss
if(af-eps) 10,10,4
10
rp=pcc2(nxckl,nyck)+pcc2(nxckp,nyck)+pcc2(nxck,nyckn)+pcc2(nxck,nyckv)
qckv=2*pi*cigm(nxck,nyck)*(rp/4-pdob)/lgr
return
end
subroutine
nachen2(nx,ny,nxck,nyck,hx,hy,tau,snn,scc2,pcc2,pcc,snn2,qdob,qflu2)
dimension snn(-1:21,-1:21),pcc2(-1:21,-1:21),scc2(-1:21,-1:21)

```

```

dimension cigm(-1:21,-1:21),fbls(-1:21,-1:21),snn2(-1:21,-1:21),pcc(-
1:21,-1:21)
real hx,hy,pdob,lgr,vi,vip,vjp,ucp,qdob
real sij,sil,sip,sjl,sjp,uij,upl,uqdob
real tau,vxp,vxl,vyp,vyl,qnag,uqnag
integer nx,ny,nxl,nxp,nyl,nyp,i,j,ip,il,jv,jn
integer nxck,nyck,nxckl,nxckp,nyckn,nyckv
external fwar,foil,fwar2,foil2
common /com1/
por,prk,prk2,prkpp,hp,muw,muo,m0,pi,h,h2,rck,scw,sww,pdob,pnag,pnag2
gdrpv(uij,upl)=2*uij*upl/(uij+upl)
lgr=log(0.2*hx/rck)
nxckl=nxck-1
nxckp=nxck+1
nyckn=nyck-1
nyckv=nyck+1
nxl=nx-1
nyl=ny-1
nxp=nx+1
nyp=ny+1
do 1 i=0,nx
do 1 j=0,ny
sij=scc2(i,j)
vi=(fwar(sij,scw)+m0*foil(sij,sww))/muw
cigm(i,j)=prk2*h*vi
fbls(i,j)=fwar(sij,scw)/vi
1 continue
do 2 i=0,nx
cigm(i,-1)=cigm(i,1)
cigm(i,nyp)=cigm(i,nyl)
fbls(i,-1)=fbls(i,1)
fbls(i,nyp)=fbls(i,nyl)
2 continue
do 3 j=0,ny
cigm(-1,j)=cigm(1,j)
cigm(nxp,j)=cigm(nxl,j)
fbls(-1,j)=fbls(1,j)
fbls(nxp,j)=fbls(nxl,j)
3 continue
do 4 i=0,nx
do 4 j=0,ny
sij=cigm(i,j)
sil=cigm(i-1,j)
sip=cigm(i+1,j)

```

```

    sjl=cigm(i,j-1)
    sjp=cigm(i,j+1)
    vxp=-gdrpv(sij,sip)*(pcc2(i+1,j)-pcc2(i,j))/hx
    vxl=-gdrpv(sij,sil)*(pcc2(i,j)-pcc2(i-1,j))/hx
    vyp=-gdrpv(sij,sjp)*(pcc2(i,j+1)-pcc2(i,j))/hy
    vyl=-gdrpv(sij,sjl)*(pcc2(i,j)-pcc2(i,j-1))/hy
    ip=0
    if(pcc2(i+1,j).gt.pcc2(i,j)) ip=1
    il=0
    if(pcc2(i-1,j).gt.pcc2(i,j)) il=1
    jv=0
    if(pcc2(i,j+1).gt.pcc2(i,j)) jv=1
    jn=0
    if(pcc2(i,j-1).gt.pcc2(i,j)) jn=1
    vip=(vxp*fbls(i+ip,j)-vxl*fbls(i-il,j))/hx
    vjp=(vyp*fbls(i,j+jv)-vyl*fbls(i,j-jn))/hy
    ucp=(pcc2(nxck,nyckn)+pcc2(nxck,nyckv)+pcc2(nxckl,nyck)+pcc2(
nxckp,nyck))/4
    !* ucp=pnn(nxck,nyck)
    qdob=2*pi*cigm(nxck,nyck)*(ucp-pdob)*fbls(nxck,nyck)/lgr
    uqdob=0
    if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck) uqdob=qdob
    qnag=2*pi*cigm(0,0)*(pcc(0,0)-pnag)*fbls(nxck,nyck)/lgr
    uqnag=0
    if(i.eq.0.and.j.eq.0) uqnag=qnag
!*****Peretok
    sz1=snn(i,j)
    sz2=scc2(i,j)
    prtok=prkpp*(fwar(sz1,scw)+m0*foil(sz1,sww))/(hp*muw)
    if(pcc(i,j).lt.pcc2(i,j))
prtok=prkpp*(fwar2(sz2,scw)+m0*foil2(sz2,sww))/(hp*muw)
    if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck) prtoc=0.0
    if(i.eq.0.and.j.eq.0) prtoc=0.0
    snn2(i,j)=scc2(i,j)-tau*(vip+vjp-prtoc*(pcc(i,j)-
pcc2(i,j))+uqnag/hx/hy+uqdob/hx/hy)/por/h
    4 continue
    do 5 i=0,nx
    snn2(i,-1)=snn2(i,1)
    snn2(i,nyp)=snn2(i,nyl)
    5 continue
    do 6 j=0,ny
    snn2(-1,j)=snn2(1,j)
    snn2(nxp,j)=snn2(nyl,j)
    6 continue

```



```

sum=0.0
do i=1,nx
  do j=1,ny
    sz=snn(i,j)
    prtok=prkpp*(fwar2(sz,scw)+m0*foil2(sz,sww))/(hp*muw)*(pcc(i,j
)-pcc2(i,j))
    if(pcc(i,j).lt.pcc2(i,j)) prtok=0.0
    if(i.eq.nxck.and.j.eq.nyck) prtok=0.0
    sum=sum+abs(prtok)
  enddo
enddo
qflu2=sum*hx*hy
return
end
!*Podprogramma functin
function fwar(s1,scw)
fwar=0.0
if(s1.gt.scw) fwar=(s1-scw)/(1-scw)
return
end
function fwar2(s1,scw)
fwar1=0.0
if(s1.gt.scw) fwar=(10.0*s1-scw)/7.0
return
end
function foil(s1,sww)
foil=0.0
if(s1.lt.sww) foil=(1-s1/sww)
return
end
function foil2(s1,sww)
foil=0.0
if(s1.lt.sww) foil=-1.25*s1+1
return
end

```

## Вывод

В выпускной работе «Одновременно-раздельная эксплуатация пропластков при разработке двухфазной жидкости» полученные основные результаты сформированы следующим образом:

1. В пятиточечной системе площадного заводнения численно исследуется взаимодействие через слабопроницаемую перемычку двухслойных неоднородных пропластков различной проницаемости.

2. В зависимости от времени совместной разработки пропластков определяется продвижение водо-нефтяного контакта и времени прорыва добывающей скважины. Это дает возможность регулировать режимы закачки воды взаимодействующих пропластков.

3. На основе радиально кольцевой сетки построен вычислительный алгоритм для применения формулы Баклея – Леверетта.

4. Предложенный алгоритм позволяет определить количество перетекающей жидкости в пропластках и коэффициенты нефтеотдачи, а также регулирует процесс вытеснения нефти водой.

5. Полученные результаты показали, что построенная радиально-кольцевая сетка в окрестности нагнетательных скважин позволяет более точно смоделировать логарифмическую зависимость давления.

6. Разработанные алгоритмы могут получить продолжение в промысловой механике для уточнения оценки запасов нефти и вычисления коэффициентов нефтеотдачи.

## Список использованных источников

1. Алишаев М.Г., Розенберг М.Д., Теслюк Е.В. Неизотермическая фильтрация при разработке нефтяных месторождений.- М: «Недра», 1985.- 273с.
2. Ентов В.М., Зазовский А.Ф. Гидродинамика процессов повышения нефтеотдачи.- М: «Недра», 1989.- 230с.
3. Чекалин А.Н. Численное решение задач фильтрации в водонефтяных пластах.- Казань: КГУ, 1982.- 204с.
4. Розенберг М.Д. Многофазовые и многокомпонентные фильтрации при добычи нефти и газа.- М: «Недра», 1976.- 355с.
5. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации нефти и газа. М., Недр, 1972
6. Алишаев М.Г., Розенберг М.Д., Теслюк Е.В. Расчет осесимметричного вытеснения нефти водой в многослойном пласте с учетом проявления структурно – механических свойств нефти при ее охлаждении.- В кн.: Добыча нефти, вып.60, ВНИИ, 1977, с. 32-42.
7. Булыкин В.Я. Гидромеханика нефтяного пласта.- М: «Недра», 1974
8. Ентов В.М., Баренблатт Г.И., Рыжик В.М. Движение жидкости и газов в природных пластах.- М: «Недра», 1984.- 207с.
9. Абрамов Г.С., Барычев А.В., Зимин М.И. Практическая расходометрия в промышленности. - М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2000.- 472 с.
10. Адонин А.Н. Процессы глубиннонасосной нефтедобычи. М.: Недр, 1964.- 264 с.
11. Анализ и выбор средств измерения расходов в системах ППД и газосборных сетях / Н.Г. Ибрагимов, В.В. Самойлов, А.И. Фролов, А.В. Ахметзянов, А.М. Касимов, А.И. Попов // Нефт. Хоз-во. 2002. - №3. - С. 74-78.
12. Андронов И.В. Измерение расхода жидкостей и газов. — М.: Энергоиздат, 1981. 88 с.
13. Артемьев В.Н., Ибрагимов Г.З., Иванов А.И. Инженерные расчеты при разработке нефтяных месторождений: Скважина промысловый сбор -ППД. - М.: Нефтегазтехнология АИ, 2004. - Т. 1. - 416 с.
14. Бадретдинов А.М., Валеев А.М. Технология добычи обводненной нефти и закачки воды в пласт установками скважинных винтовых насосов // Нефтяное хозяйство. 2007. - № 1. - С. 68-70.
15. Базив В.Ф., Закиров С.Н. Некоторые проблемы разработки многопластовых месторождений // Нефтяное хозяйство. — 2002. №11. - С. 58-60.
16. Безопасное ведение работ при отдельной эксплуатации пластов одной скважиной / Р.Я.Нугаев, Ш.Т.Джафаров, И.Г. Шарафутдинов и др. М.: Недр, 1979. - 127с.
17. Валеев М.Д., Газаров А.Г., Масенкин В.А., и др. Разработка и результаты испытаний оборудования для одновременно-отдельной

- эксплуатации скважин с установками электроцентробежных насосов// Нефтяное хозяйство. 2008. - №2. - с. 86-88.
18. Валеев М.Д., Мангушев К.Х., Уразаков К.Р. Влияние свойств добываемой жидкости на показатели надежности УСШН. Депонирована ВНИИО
19. ЭНГом, №2000-НГ93 биб. Указатель ВНИТИ «Депонированные научные работы», 1993. №8.
20. Грайфер В.И., Ишемгужин С.Б., Яковенко Г.А. Оптимизация добычи нефти глубинными насосами. Казань: Татарское книжное издательство, 1973.-216 е.: ил.
21. Гуревич А.С. Исследование процесса сепарации газа у приема погружного оборудования, работающего в нефтяной скважине: Авт. дис. на со-иск. учен, степени канд. техн. наук. М.: МИНХиГП им. И.М. Губкина, 1973. -24 с.
22. Давиташвили Г.И., Гарипов О.М. Внедрение одновременно-раздельной закачки на Приобском месторождении // Нефтяное хозяйство. -2006.-№ 12.-С. 73-75.
23. Дияшев Р.Н., Мусабирова Н.Х, Иктисанов В.А. Методическое руководство по определению оптимальных пластовых и забойных давлений. Бу-гульма: ТатНИПИнефть, 1997.
24. Дияшев Р.Н., Рамазанов Р.Г., Закиров И.З. Исследование совместной и раздельной разработки многопластовых нефтяных месторождений // Наука и технология углеводородов. 2002. - №3(22). - С. 47 - 54.
25. Донков П.В., Леонов В.А., Войтов О.В. Применение гидроразрыва пласта при площадной ограниченности залежи / Интенсификация добычи нефти и газа. Труды Международного технологического симпозиума. РАГС при Президенте РФ М.- 2003 г.
26. Донков П.В., Леонов В.А., Кирилов С.И., С.И Савченко Идентификация гидродинамической модели неоднородных пластов. Интенсификация добычи нефти и газа. Труды Международного технологического симпозиума. РАГС при Президенте РФ М.- 2003 г.
27. Донков П.В., Леонов В.А., Соколов А.Н., Спивак Т.С. Исследование скважин, эксплуатируемых бескомпрессорным газлифтом на Ван-Еганском месторождении./ Научная конференция. СибНИИНП. Тюмень. - 2000.
28. Донков П.В., Леонов В.А., Сорокин А.В., Сабанчин И.В. Разукрупнение объектов разработки для повышения их нефтеотдачи. / Интенсификация добычи нефти и газа. Труды Международного технологического симпозиума. РАГС при Президенте РФ М.- 2003 г.
29. Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А. и др. Скважинные насосные установки для добычи нефти М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. - 315 с.
30. Иоаким Г. Добыча нефти и газа. М.: Недра, 1966. - 471 с.

31. Круман Б.Б. Расчеты при эксплуатации скважин штанговыми насосами. -М.: Недра, 1980.
32. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. М.: Наука, 1989. —Т. VII. Теория упругости. — 246 с.
33. Леонов В.А. Одновременно-раздельная эксплуатация нескольких пластов одной сеткой скважин для повышения их нефтеотдачи. Доклад на заседании общества нефтяников SPE. Нижневартовск — 2001.
34. Леонов В.А. Оптимизация работы газлифтного комплекса (на примере Правдинского и Самотлорского месторождений). Автореферат диссертации кандидата технических наук Тюмень. - 1987.
35. Леонов В.А. Оптимизация работы низкодебитных газлифтных скважин.// Проблемы подъема жидкости с высоким газосодержанием из скважин с низкопродуктивных залежей (Выездное заседание НТС Миннеф-тепрома). -1989.
36. Леонов В.А. Резервы газлифтного способа в увеличении добычи нефти на Самотлорском месторождении. 4-я научно техническая конференция РГУ Н и Г им. И.М. Губкина. Москва 2001.
37. Леонов В.А., Донков П.В. Интенсификация добычи нефти при разработке газонефтяных месторождений. XV Губкинские чтения. Перспективные направления, методы и технологии комплексного изучения нефтегазо-носности недр. Секция Геология. Москва. - 1999 - с.179.
38. Леонов В.А., Донков П.В. Мониторинг внедрения методов увеличения, нефтеотдачи для освоения залежей высоковязкой нефти. Международный симпозиум «Повышение нефтеотдачи пластов». РАГС. Москва 2002 г.
39. Леонов В.А., Донков П.В. Одновременно раздельная эксплуатация нескольких пластов одной скважиной на Ван Ёганском месторождении 4-я научно техническая конференция РГУ Н и Г им. И.М. Губкина,. Москва -2001.