Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского

Кафедра аэрогидромеханики

Специальность (направление): 010800.68 – Механика и математическое моделирование
Специализация: Механика жидкости, газа и плазмы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

«Исследование термогидродинамических процессов в нефтяном пласте»

Работа завершена:
«__»_____2014г. _____(Д.М. Сагдиева)

Работа допущена к защите:
Научный руководитель
д.т.н.
«__»_____2014г. _____(М.Н. Шамсиев)

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., профессор
«__»_____2014г. _____(А.Г. Егоров)

Казань - 2014

Содержание

1. Список обозначений …….....3
2. Введение 4
3. Вывод уравнения энергии однофазного фильтрационного потока.....6
4. Постановка задачи …….....10
5. Численное решение …….....11
6. Вычислительный алгоритм …….....13
7. Результаты расчётов ……...……15
8. Вывод ……...……22
9. Список используемой литературы ……...……..23
10. Приложение…….…24

Список обозначений

β^* – сжимаемость, $\left[\frac{1}{МПа}\right]$;

k – проницаемость, $[мкм^2]$;

μ – вязкость, $[мПа * сек]$;

r_c – радиус скважины, $[м]$;

R_k – радиус контура питания, $[м]$;

t – время, $[сут]$;

$C_{пл}$ – объёмная теплоёмкость пласта, $\left[\frac{Дж}{м^3 * К}\right]$;

$C_{ср}$ – удельная теплоёмкость среды, $\left[\frac{Дж}{кг * К}\right]$;

$C_{ж}$ – удельная теплоёмкость жидкости, $\left[\frac{Дж}{кг * К}\right]$;

ρ – плотность, $\left[\frac{кг}{м^3}\right]$;

m – пористость;

ε – коэффициент Джоуля – Томсона, $\left[\frac{К}{МПа}\right]$;

η – коэффициент адиабатического охлаждения, $\left[\frac{К}{МПа}\right]$;

p_k – пластовое давление, $[МПа]$;

T_k – пластовая температура, $[К]$;

H – толщина пласта, $[м]$;

Q – дебит скважины, $\left[\frac{м^3}{сек}\right]$;

C – коэффициент влияния ствола скважины, $\left[\frac{м^3}{МПа}\right]$.

Введение

При разработке нефтяных пластов содержащиеся в них флюиды могут приобрести температуру, отличную от естественной температуры пластов. Изменение температуры в продуктивных пластах может быть вызвано различными причинами, в зависимости от характера фильтрации природных флюидов и вида искусственного теплового воздействия на продуктивные коллекторы в процессе применения той или иной технологии разработки.

Можно выделить три основные группы причин, приводящих к неизотермическим условиям фильтрации [5].

1. Действие термодинамических эффектов при движении пластовых флюидов в пористой среде:

− баротермический эффект (эффекты Джоуля - Томсона и адиабатического расширения);

− геотермический градиент;

− эффект фазовых превращений (при выделении растворенного газа, выпадении парафина и др.);

− гравитационный эффект.

2. Нагнетание в пласты различных рабочих агентов - теплоносителей с температурой, отличной от начальной пластовой, с целью поддержания пластового давления и повышения степени извлечения нефти:

− холодной воды с температурой ниже начальной пластовой;

− горячей воды с температурой выше пластовой;

− пара или пароводяной смеси, температура которой существенно превышает пластовую.

3. Осуществление различных термохимических окислительных процессов, в результате которых происходит генерация теплоты в коллекторах и призабойных зонах скважин:

− внутрипластовое горение;

− различные экзотермические реакции при обработке пластов и др.

При разработке месторождений возникают различные сочетания и комбинации указанных процессов, что приводит к неизотермическому характеру фильтрации. Тепловое воздействие на пласт изменяет основные фильтрационные параметры: вязкость флюидов, капиллярные силы, реологические свойства движущихся агентов и др. При этом изменяются коэффициенты вытеснения, фазовые проницаемости и т.д., вследствие чего температурный фактор существенно влияет как на текущие фильтрационные характеристики, так и на конечную нефтеотдачу.

При рассмотрении гидродинамики процессов неизотермической фильтрации использование дифференциальных уравнений оказывается уже недостаточным. В этом случае появляется новая неизвестная переменная-температура T, а характеристики флюида (его плотность ρ и коэффициент вязкости η) меняются вместе с T: $\rho = \rho\ (p, T)$, $\eta = \eta\ (p, T)$.

Для замыкания системы уравнений необходимо дополнительно привлекать уравнение, определяющее изменение температуры флюида во времени и пространстве. Это уравнение можно получить, записав закон сохранения энергии (первый закон термодинамики) для пластовой системы. Но породы - коллекторы и насыщающие их флюиды обладают различными термодинамическими и реологическими свойствами. Поэтому при записи этого закона приходится вводить две температуры: температуру жидкости T и температуру скелета $T_{ск}$.

Общие соображения показывают, что разность между температурами жидкой и твердой фаз в процессе фильтрации должна быстро исчезать из-за огромной поверхности теплообмена между флюидами и скелетом, так что температуры допустимо считать одинаковыми [5].

В данной работе рассматривается неизотермическая фильтрация нефти к вертикальной скважине. Исследуется влияние фильтрационных и теплофизических параметров пласта на изменение давления и температуры на забое скважины.

1. Вывод уравнения энергии однофазного фильтрационного потока

Уравнение баланса энергии в пластах с учетом различных факторов рассматривалось И. А. Чарным, Э. Б. Чекалюком, М.Д. Розенбергом, П.П.Золотаревым, Е. В. Теслюком [5, 6].

Для одномерного потока жидкости в направлении оси x в цилиндрическом элементе длиной dx и площадью сечения ω соотношение, выражающее баланс энергии для системы жидкость − пористая среда имеет вид [2]:

$$d(U + \Pi) = \delta A^{(e)} + \delta Q^{(e)} \ , \qquad (1.1)$$

где U − внутренняя энергия некоторого объема флюида и скелета, Π – энергия флюида в поле потенциальных сил, $\delta Q^{(e)}$ – количество теплоты, получаемое рассматриваемым объемом извне; $\delta A^{(e)}$ – совершенная над ним работа внешних сил, записывается в виде

$$d(U + \Pi) = \frac{\partial}{\partial t}[m\rho u + (1 - m)\rho_{ск} u_{ск} + m\rho g z]\omega dx dt \ , \qquad (1.2)$$

где m − пористость; $\rho_{ск}$ − плотность зерен породы; z − отметка высоты; u и $u_{ск}$ − соответственно внутренняя энергия единицы массы жидкости и скелета.

Вектор потока теплоты в этом случае можно выразить в виде

$$q = \rho u w - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} . \qquad (1.3)$$

Теплота поступает через сечения x и уходит через сечение $x + dx$. Поэтому:

$$\delta Q^{(e)} = -\frac{\partial q}{\partial x} dx \omega dt = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - \rho u w\right) \omega dx dt. \qquad (1.4)$$

Работа внешних сил $\delta A^{(e)}$, совершаемая при перемещении из сечения x в положение $x + dx$, складывается из работы сил давления $\delta A_p^{(e)}$ и силы тяжести $\delta A_g^{(e)}$, которые соответственно равны:

$$\delta A_p^{(e)} = [p(x)w(x) - p(x + dx)w(x + dx)]\omega dt = -\frac{\partial (pw)}{\partial x} dx \omega dt \ ;$$

$$\delta A_g^{(e)} = [\rho(x)gz(x)w(x) - \rho(x+dx)gz(x+dx)w(x+dx)]\omega dt =$$

$$= -\frac{\partial}{\partial x}(\rho gzw)dx\omega dt\,.$$

Отсюда находится:

$$\delta A^{(e)} = -\frac{\partial}{\partial x}(pw + \rho gzw)\omega dxdt. \qquad (1.5)$$

Подставив (1.2), (1.4) и (1.5) в равенство (1.1) и сократив на $\omega dxdt$, получается

$$\frac{\partial}{\partial t}[m\rho u + (1-m)\rho_{\text{ск}}u_{\text{ск}} + m\rho gz] = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x} - \rho uw - pw - \rho gzw\right). \qquad (1.6)$$

Использовав уравнение неразрывности для одномерного потока в виде

$$\frac{\partial(m\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = 0\,,$$

уравнение (1.6) преобразуется следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) = u\left(\frac{\partial(m\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(pw)}{\partial x}\right) + m\rho\frac{\partial u}{\partial t} + \rho w\frac{\partial u}{\partial x} =$$

$$= \rho\left(m\frac{\partial u}{\partial t} + w\frac{\partial u}{\partial x}\right);$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(pw) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p}{\rho}\rho w\right) = \frac{p}{\rho}\frac{\partial}{\partial x}(\rho w) + \rho w\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p}{\rho}\right) = \frac{p}{\rho}\frac{\partial(m\rho)}{\partial t} + \rho w\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p}{\rho}\right);$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\rho gz) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho gzw) = \rho gw\frac{\partial z}{\partial x}\,.$$

В последнем равенстве учтено, кроме того, условие стационарности и однородности гравитационного поля:

$$\frac{\partial(gz)}{\partial t} = 0\,, \quad g = const\,.$$

После этих преобразований уравнение (1.6) принимает вид

$$m\rho\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}[(1-m)\rho_{\text{ск}}u_{\text{ск}}] + \rho gw\frac{\partial z}{\partial x} + \rho w\frac{\partial}{\partial x}\left(u + \frac{p}{\rho}\right) - \frac{p}{\rho}\frac{\partial(m\rho)}{\partial t} = \; =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right). \qquad (1.7)$$

С учетом того, что

$$m\rho\frac{\partial u}{\partial t}-\frac{p}{\rho}\frac{\partial(m\rho)}{\partial t}=m\rho\frac{\partial}{\partial t}\left(u+\frac{p}{\rho}\right)-\frac{\partial}{\partial t}(mp),$$

вводится энтальпия

$$i=u+\frac{p}{\rho}\ , \tag{1.8}$$

а внутренняя энергия единицы объема твердого скелета породы выражается пропорционально его температуре

$$(1-m)\rho_{\text{ск}}u_{\text{ск}}=c_{\text{ск}}T\ , \tag{1.9}$$

где $c_{\text{ск}}$ – объемная теплоемкость скелета [Дж/(м^3 · К)], и (1.7) представляется в виде

$$m\rho\frac{\partial i}{\partial t}+c_{\text{ск}}\frac{\partial T}{\partial t}+\rho gw\frac{\partial z}{\partial x}+\rho w\frac{\partial i}{\partial x}-\frac{\partial(mp)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right). \tag{1.10}$$

Полный дифференциал энтальпии в переменных p и T записывается в виде

$$di=c_p(dT+\varepsilon_i dp)\ , \tag{1.11}$$

где c_p – изобарная теплоемкость флюида $\left(c_p=\frac{\partial i}{\partial T}\right)$; ε_i – коэффициент Джоуля-Томсона.

Из равенства (1.11) находится:

$$\frac{\partial i}{\partial t}=c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\varepsilon_i\frac{\partial p}{\partial t}\right);\quad \frac{\partial i}{\partial x}=c_p\left(\frac{\partial T}{\partial x}+\varepsilon_i\frac{\partial p}{\partial x}\right).$$

Подставив эти выражения в (1.10), получается после преобразований искомое уравнение энергии для одномерного фильтрационного потока:

$$c_{\text{п}}\frac{\partial T}{\partial t}+\rho wc_p\left(\frac{\partial T}{\partial x}+\varepsilon_i\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{g}{c_p}\frac{\partial z}{\partial x}\right)-m\rho c_p\eta_s\frac{\partial p}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right). \tag{1.12}$$

Здесь учтено, что пористая среда недеформируема, т. е. $\frac{\partial m}{\partial t}=0$ и введены обозначения: $c_{\text{п}}=m\rho c_p+c_{\text{ск}}$ – теплоемкость насыщенной пористой среды; $\eta_s=\frac{1}{\rho c_p}-\varepsilon_i$ - коэффициент адиабатического охлаждения.

Уравнение (1.12) выражает тот факт, что изменение температуры системы скелет − флюид $\left(c_{\text{п}}\frac{\partial T}{\partial t}\right)$ определяется следующими факторами:

1) конвективным переносом теплоты $\rho w c_p \frac{\partial T}{\partial x}$;

2) дроссельным эффектом $\rho w c_p \varepsilon_i \frac{\partial p}{\partial x}$;

3) превращением потенциальной энергии поля силы тяжести в тепловую $\rho w g \frac{\partial z}{\partial x}$;

4) эффектом адиабатического охлаждения $\left(-m\rho c_p \eta_s \frac{\partial p}{\partial t}\right)$;

5) теплопроводностью $\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)$.

Уравнение (1.11) можно обобщить и на случай трехмерного течения:

$$c_{\text{п}}\frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \vec{w}\left(\nabla T + \varepsilon_i \nabla p - \frac{\vec{g}}{c_p}\right) - m\rho c_p \eta_s \frac{\partial p}{\partial t} = div(\lambda \nabla T).$$

2. Постановка задачи

Рассматривается неизотермическая фильтрация в окрестности вертикальной скважины. При расчетах процессов неизотермической фильтрации в окрестности скважины пренебрегают теплопроводностью вдоль направления течения, поскольку ее эффект мал по сравнению с конвективным переносом и не учитывается потенциальная энергия поля силы тяжести. С учетом этих предположений, процесс нестационарной фильтрации в круговом пласте к скважине описывается системой уравнений [8 – 10]:

$$\beta^* \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{k}{\mu} r \frac{\partial p}{\partial r}\right), \quad r_c < r < R_k, \quad t > 0, \tag{2.1}$$

$$\text{С}_{\text{пл}} \frac{\partial T}{\partial t} = \rho_{\text{ж}} \text{С}_{\text{ж}} \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}\left(\frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon \frac{\partial p}{\partial r}\right) + \eta\, \rho_{\text{ж}} \text{С}_{\text{ж}} \frac{\partial p}{\partial t}, \; r_c < r < R_k, \; t > 0 \tag{2.2}$$

с начальными

$$p\,(r, 0) = p_k, \tag{2.3}$$

$$T(r, 0) = T_k \tag{2.4}$$

и граничными условиями

$$p\left(R_k, t\right) = p_k, \tag{2.5}$$

$$\frac{2\pi k H}{\mu}\left(r \frac{\partial p}{\partial r}\right)\Big|_{r=r_c} = Q + C\frac{\partial p}{\partial t}, \quad t > 0, \tag{2.6}$$

$$T(R_k, t) = T_k, \tag{2.7}$$

где $\beta^* = \beta_{\text{с}} + m\,\beta_{\text{ж}}$, β_c и $\beta_{ж}$ – соответственно сжимаемость пористой среды и жидкости, k – проницаемость, μ – вязкость, r_c – радиус скважины, R_k – радиус контура питания, $C_{\text{пл}} = (m-1)\rho_{\text{ср}}C_{\text{ср}} + m\rho_{\text{ж}}C_{\text{ж}}$ – объёмная теплоёмкость пласта, m – пористость, $\rho_{\text{ср}}$ – плотность среды, $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, $\text{С}_{\text{ср}}$ – удельная теплоёмкость среды, $C_{\text{ж}}$ – удельная теплоёмкость жидкости, ε – коэффициент Джоуля – Томсона, η – коэффициент адиабатического охлаждения, p_k – пластовое давление, T_k – пластовая температура, H – толщина пласта, Q – дебит скважины, C – коэффициент влияния ствола скважины.

3.Численное решение

Для численного решения системы уравнений (2.1) − (2.7) применяется метод конечных разностей [3]. Для этого область решения покрывается неравномерной сеткой, которая сгущается к скважине. Построение такой сетки проводится с помощью преобразования координат [1]

$$u = \ln r. \tag{3.1}$$

В результате преобразования координат (3.1) система (2.1) − (2.7) преобразуется к следующему виду:

$$\beta^* \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{e^{2u}} \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial u} \right), \tag{3.2}$$

$$C_{\text{пл}} \frac{\partial T}{\partial t} = \rho_{\text{ж}} C_{\text{ж}} \frac{k}{\mu} \frac{1}{e^{2u}} \frac{\partial p}{\partial u} \left(\frac{\partial T}{\partial u} + \varepsilon \frac{\partial p}{\partial u} \right) + \eta\, \rho_{\text{ж}}\, \text{C}_{\text{ж}} \frac{\partial p}{\partial t} \tag{3.3}$$

$$p\,(u, 0) = p_k\,, \tag{3.4}$$

$$T(u, 0) = T_k\,, \tag{3.5}$$

$$p\,(U_{k,} t) = p_k\,, \tag{3.6}$$

$$\frac{2\pi k H}{\mu} \frac{\partial p}{\partial u}\bigg|_{u=u_c} = Q + C \frac{\partial p}{\partial t}\,, \tag{3.7}$$

$$T(U_k, t) = T_k\,. \tag{3.8}$$

В области $\Omega = \{\ln r_c = u_c < u < U_k = \ln R_k,\ 0 < t \le T\}$ вводятся сетки узлов

$$\overline{\omega}_h = \{u_i,\quad u_c = u_1 < u_2 < \ldots < u_N = U_k,$$

$$u_i = u_1 + (i-1)h,\ h = (u_N - u_1)/(N-1)\},$$

$$\overline{\omega}_\tau = \{t_n,\quad 0 = t_0 < t_1 < \ldots < t_M = T,\ t_n - t_{n-1} = \tau_n\},$$

и полагается $p_i^n = p(u_i, t_n)$, $T_i^n = T(u_i, t_n)$.

Для построения разностной схемы, аппроксимирующей задачу, используется интегро − интерполяционный метод [3], который основан на законах сохранения для отдельных ячеек разностной сетки. В результате получается однородная схема, которая имеет вид:

$$\beta^* \frac{p_i^n - p_i^{n-1}}{\tau_n} = \frac{1}{e^{2u_i}} \frac{k}{\mu} \left(\frac{p_{i+1}^n - 2p_i^n + p_{i-1}^n}{h^2}\right),\ i = \overline{2, N-1},\ n = \overline{1, M}, \tag{3.9}$$

$$C_{\text{пл}}\frac{T_i^n-T_i^{n-1}}{\tau_n}=\rho_{\text{ж}}\text{C}_{\text{ж}}\frac{k}{\mu}\frac{1}{e^{2u_i}}\frac{p_{i+1}^n-p_i^n}{h}\left(\frac{T_{i+1}^n-T_i^n}{h}+\varepsilon\frac{p_{i+1}^n-p_i^n}{h}\right)+\eta\,\rho_{\text{ж}}\,\text{C}_{\text{ж}}\frac{p_i^n-p_i^{n-1}}{\tau_n}, \quad (3.10)$$

$$i=\overline{1,N-1},\ n=\overline{1,M}.$$

$$p_i^0=p_k\ ,\ i=\overline{1,N}, \quad (3.11)$$

$$T_i^0=T_k\ ,\ \ i=\overline{1,N}, \quad (3.12)$$

$$p_N^n=p_k\ ,\ n=\overline{1,M}, \quad (3.13)$$

$$T_N^n=T_k,\ n=\overline{1,M}\ , \quad (3.14)$$

$$\frac{2\pi kH}{\mu}\frac{p_2^n-p_1^n}{h}=Q+C\frac{p_1^n-p_1^{n-1}}{\tau_n},\ \ n=\overline{1,M}. \quad (3.15)$$

4. Вычислительный алгоритм

Для решения системы (3.9), (3.11), (3.13), (3.15) применяется метод прогонки [4]. Метод прогонки или алгоритм Томаса используется для решения систем линейных уравнений вида $Ax = F$, где A − трёхдиагональная матрица. Искомые значения давления в узлах сетки связаны рекуррентным соотношением:

$$p_i = \alpha_{i+1}\, p_{i+1} + \beta_{i+1}\,, \quad i = \overline{N-1,1}. \tag{4.1}$$

Разностное уравнение (3.9) приводится к виду :

$$p_{i-1}^n \left[\frac{1}{e^{2u_i}}\,\frac{k}{\mu}\,\frac{1}{h^2}\right] + p_i^n \left[-\frac{2}{e^{2u_i}}\frac{k}{\mu}\frac{1}{h^2} - \frac{\beta^*}{\tau_n}\right] + p_{i+1}^n \left[\frac{1}{e^{2u_i}}\,\frac{k}{\mu}\,\frac{1}{h^2}\right] = -\frac{\beta^*}{\tau_n}\, p_i^{n-1}, \tag{4.2}$$

Далее, коэффициенты α_{i+1}и β_{i+1} вычисляются по следующим формулам:

$$\alpha_{i+1} = -\frac{B_i}{A_i\,\alpha_i + C_i}\,, \tag{4.3}$$

$$\beta_{i+1} = \frac{F_i - A_i B_i}{A_i\,\alpha_i + C_i}\,, \qquad i = 2, N, \tag{4.4}$$

где

$$A_i = \frac{1}{e^{2u_i}}\,\frac{k}{\mu}\,\frac{1}{h^2}\,,$$

$$B_i = \frac{1}{e^{2u_i}}\,\frac{k}{\mu}\,\frac{1}{h^2}\,,$$

$$C_i = -\frac{2}{e^{2u_i}}\frac{k}{\mu}\frac{1}{h^2} - \frac{\beta^*}{\tau_n}\,,$$

$$F_i = -\frac{\beta^*}{\tau_n}\, p_i^{n-1}. \tag{4.5}$$

Для вычисления α_2 и β_2 граничное условие (3.15) записывается в виде

$$p_1^n = \frac{p_2^n - b}{a}\,, \tag{4.6}$$

где

$$a = 1 + C\,\frac{1}{\tau_n}\,\frac{h}{d}\,, \qquad b = \frac{Qh}{d} - C\,\frac{p_1^{n-1}}{\tau_n}\,\frac{h}{d}\,, \qquad d = \frac{2\pi kH}{\mu}\,.$$

Рекуррентное соотношение (4.1) при $i = 1$ записывается в виде

$$p_1 = \alpha_2\, p_2 - \beta_2\,. \tag{4.7}$$

Сравнивая (4.6) и (4.7) , получается

$$\alpha_2 = \frac{1}{a}\,, \quad \beta_2 = \frac{b}{a}\,. \tag{4.8}$$

Далее, неизвестное p_i находим из рекуррентного соотношения (4.1) при условии $p_N = p_k$.

Для решения системы (3.10), (3.14) вычислительный алгоритм строится следующим образом:

$$T_i^n = \frac{y_i}{x_i} T_{i+1}^n + C_{\text{пл}} \frac{1}{\tau_n x_i} T_i^{n-1} + \varepsilon \frac{p_{i+1}^n - p_i^n}{h} \frac{1}{x_i} + \eta \rho_{\text{ж}} \text{C}_{\text{ж}} \frac{p_i^n - p_i^{n-1}}{\tau_n} \frac{1}{x_i},$$

$$i = \overline{N-1, 2}, \tag{4.9}$$

где

$$T_1^n = T_k,$$

$$x_i = C_{\text{пл}} \frac{1}{\tau_n} + \rho_{\text{ж}} \text{C}_{\text{ж}} \frac{k}{\mu} \frac{1}{e^{2u_i}} \frac{p_{i+1}^n - p_i^n}{h^2},$$

$$y_i = \rho_{\text{ж}} \text{C}_{\text{ж}} \frac{k}{\mu} \frac{1}{e^{2u_i}} \frac{p_{i+1}^n - p_i^n}{h^2}.$$

На основе вычислительного алгоритма для моделирования неизотермической фильтрации к вертикальной скважине создан программный комплекс в среде Delphi 7. Листинг программы приведён в приложении.

5. Результаты расчётов

Рассматривается круговой пласт со следующими параметрами: H=10 *м*; R_k=100 *м*; r_c= 0.1 *м*; p_k= 10 *МПа*; β^* = $10^{-4}\ \frac{1}{МПа}$; ρ = 850 $\frac{кг}{м^3}$; Q =5 $\frac{м3}{сут}$; t = 5 *сут*; T_k=300 *K*; μ=10 *мПа*сек*; k = 0.01 *мкм*^{2}; $C_ж$ = 1800 $\frac{Дж}{кг*К}$; ε = 0.3$\frac{К}{МПа}$; η = 0.014$\frac{К}{МПа}$.

Результаты расчётов приведены на рис. 1 − 9.

На рис.1 приводится кривая восстановления давления (КВД) и ее логарифмическая производная без учета влияния ствола скважины [7, 9]. График логарифмической производной кривой восстановления давления для однородного пласта в билогарифмических координатах является прямой линией, параллельной оси абсцисс (кривая − □). Это является диагностическим признаком радиального потока при упругом режиме фильтрации в однородном пласте. Отклонение конечного участка графика логарифмической производной характеризуется влиянием границы пласта.

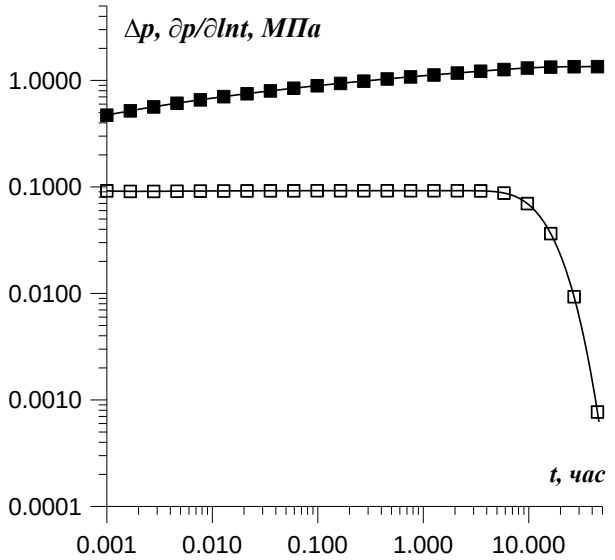

Рис. 1.

■ – КВД, □ − логарифмическая производная КВД.

Коэффициент влияния ствола скважины C = 0

На рис.2 приводится КВД и ее логарифмическая производная, когда коэффициент влияния ствола скважины $C = 1$ *м*^{3}/*МПа*. Наличие тангенс угла на-

клона начального участка КВД и ее логарифмической производной равной единице является диагностическим признаком влияния ствола скважины соответственно притока жидкости в ствол скважины после ее остановки. При пуске скважины в начальный момент жидкость отбирается из ствола и только через некоторое время в работу включается пласт. Необходимо отметить, что при небольших дебитах скважины интерпретация КВД без учета влияния ствола скважины может привести к большим погрешностям оценок фильтрационных и емкостных параметров нефтяного пласта.

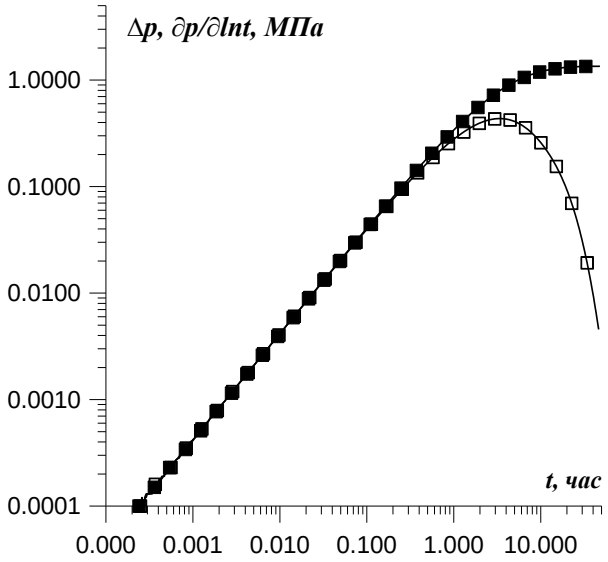

Рис. 2.

■ – КВД, □ − логарифмическая производная КВД.

Коэффициент влияния ствола скважины C = 1 $м^3/МПа$

Далее исследуется влияние теплофизических и фильтрационных параметров пласта на изменение давления и температуры после пуска скважины [10].

На рис. 3, 4 приводится изменение забойного давления после пуска скважины при различных значениях проницаемости и вязкости.

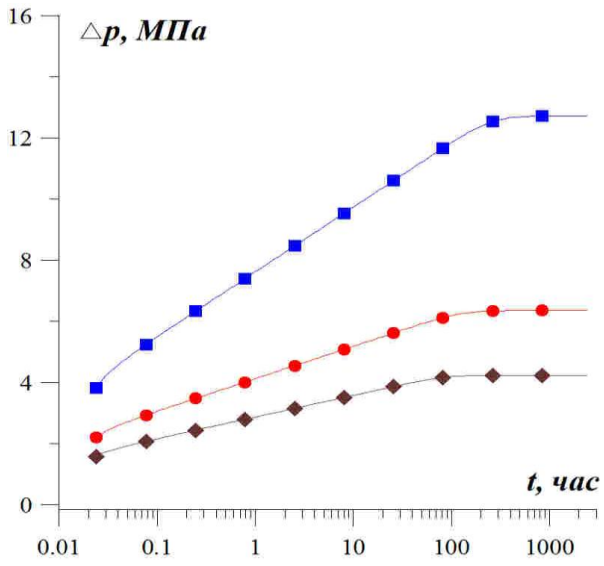

Рис. 3.

Изменение забойного давления при различных значениях проницаемости.

■ - k = 0.005, ● - k = 0.01, ◆ - k = 0.015

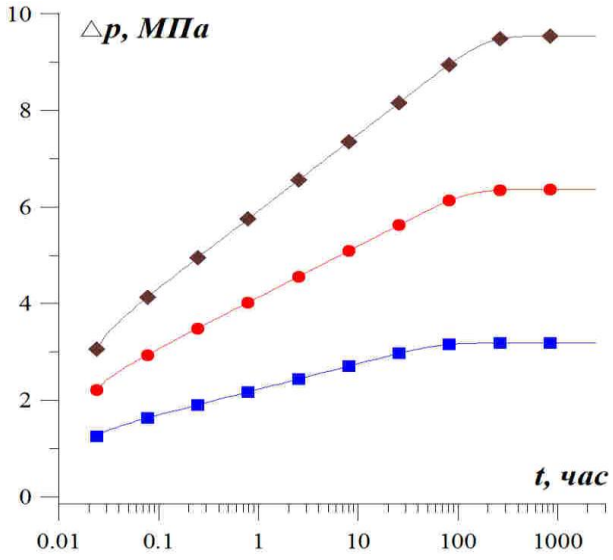

Рис. 4.

Изменение забойного давления при различных значениях вязкости.

■ - μ = 5, ● - μ = 10, ◆ - μ = 15

Результаты расчётов показывают, что давление зависит только от фильтрационных параметров пласта и не зависит от теплофизических параметров.

На рис. 5 показано изменение температуры в забое скважины после её запуска в зависимости от влияния ствола скважины.

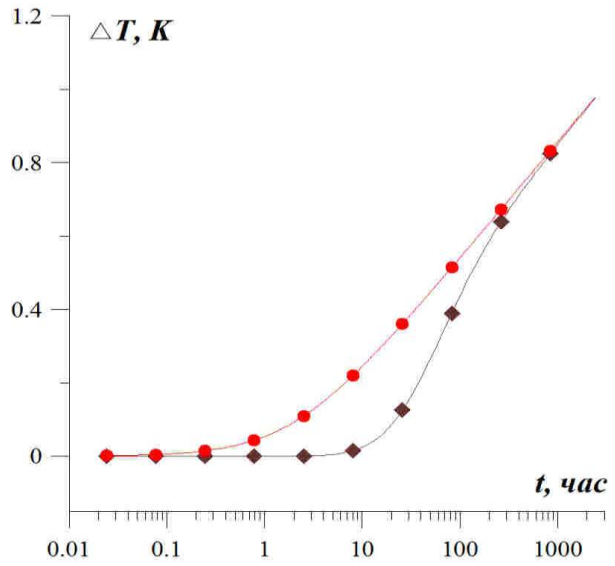

Рис. 5.

Изменение температуры в забое скважины при разном коэффициенте влияния ствола скважины.

● - $C = 0$, ◆ - $C = 1$ $м^3/МПа$

Из рис. 5 видно, что коэффициент влияния ствола скважины влияет только на начальный участок кривой изменения температуры.

На рис. 6 − 9 приводятся графики зависимости температуры от теплофизических и фильтрационных параметров пласта.

На рис. 6, 7 приводятся графики зависимости температуры от теплофизических параметров пласта.

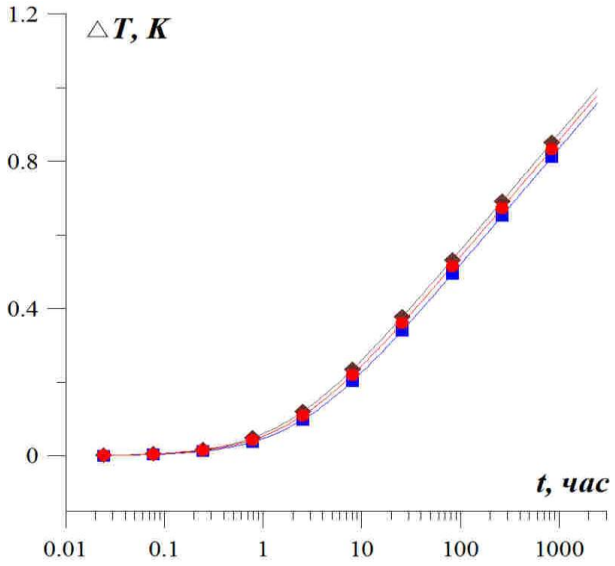

Рис. 6.

Зависимость температуры от теплоёмкости жидкости.

■ - $C_ж$ = 1500, ● - $C_ж$ = 1800, ◆ - $C_ж$ = 2100

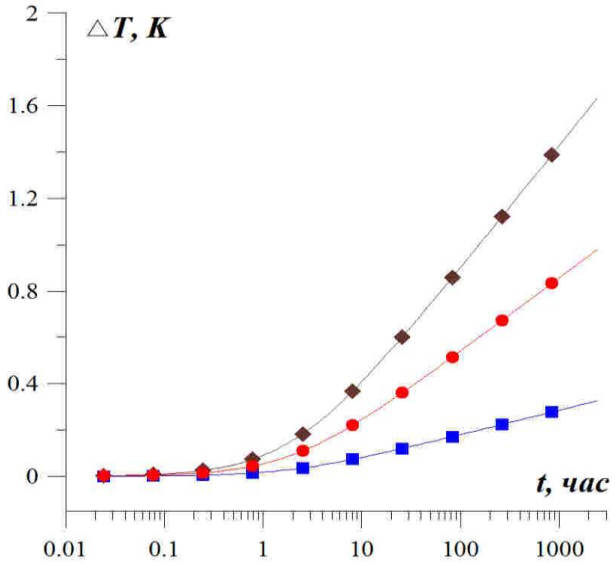

Рис. 7.

Зависимость температуры от коэффициента Джоуля − Томсона.

■ - ε = 0.1, ● - ε = 0.3, ◆ - ε = 0.5

Из полученных результатов видно, что наибольшее влияние на изменение температуры оказывает коэффициент Джоуля − Томсона (рис. 7). Теплоёмкость жидкости (рис. 6) мало влияет на изменение температуры.

На рис. 8, 9 приводятся графики зависимости температуры от фильтрационных параметров пласта. Уменьшение проницаемости пласта приводит к увеличению перепада температуры, а вязкости – к уменьшению.

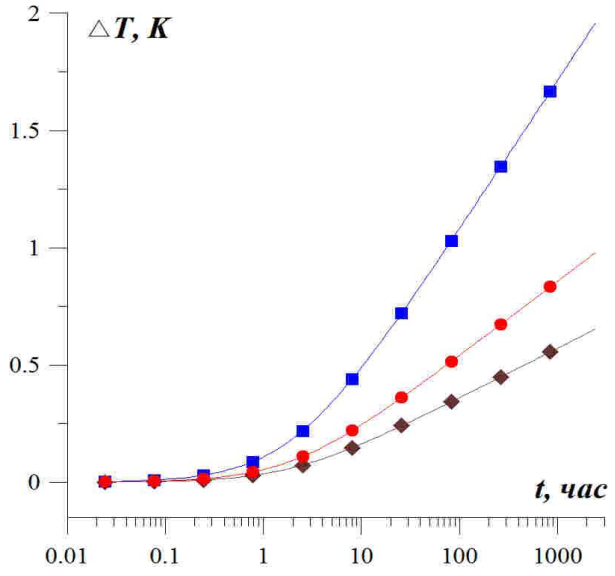

Рис. 8.

Зависимость температуры от проницаемости.

■ - k = 0.005, ● - k = 0.01, ◆ - k = 0.015

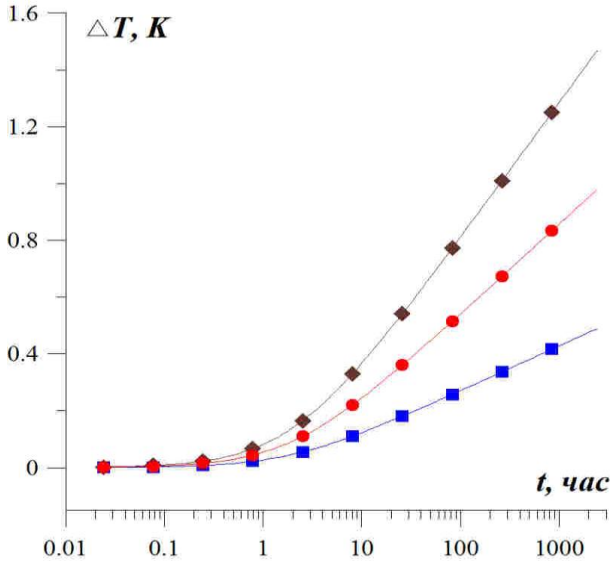

Рис. 9

Зависимость температуры от вязкости.

■ - μ = 5, ● - μ = 10, ◆ - μ = 15

Результаты расчетов показывают, что наибольшее влияние на изменение температуры оказывают фильтрационные параметры пласта и коэффициент Джоуля – Томсона.

Вывод

1. Построен вычислительный алгоритм для численного исследования термогидродинамических процессов в нефтяном пласте.

2. Показан диагностический признак радиальной фильтрации к вертикальной скважине в однородном пласте и коэффициента влияния ствола скважины.

3. С помощью численных расчетов построены графики изменения забойного давления и температуры с течением времени и в зависимости от фильтрационных и теплофизических параметров.

4. На основе численных результатов показано, что распределение давления зависит от фильтрационных параметров, а распределение температуры от фильтрационных и теплофизических параметров. Наибольшее влияние на изменение температуры оказывают фильтрационные параметры пласта и коэффициент Джоуля – Томсона.

Список используемой литературы

1. Азиз, Х. Математическое моделирование пластовых систем /Х.Азиз, Э.Сеттари.– М.: Недра, 1982. – 407 с.

2. Басниев, К.С. Подземная гидромеханика /К.С.Басниев, И.Н.Кочина, В.М.Максимов.– М.: Недра, 1993. – 303 с.

3. Самарский, А.А. Теория разностных схем /А.А. Самарский.– М.: Наука, 1977. – 611с.

4. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений /А.А.Самарский, С.Е.Николаев.– М.: Наука, 1978. – 352 с.

5. Чарный, И.А. Подземная гидрогазодинамика / И.А. Чарный.– М.: Гостоптехиздат, 1963. – 392 с.

6. Чекалюк, Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта / Э.Б.Чекалюк.– М.: Недра, 1965. – 240 с.

7. Шагиев, Р.Г. Исследование скважин по КВД / Р.Г.Шагиев.– М.: Наука, 1998.

8. Щелкачев, В.Н. Подземная гидравлика /В.Н.Щелкачев, Б.Б.Лапук.- М.Л.: Гостоптехиздат, 1949. – 524 с.

9. Сагдиева, Д.М. Исследование влияния объема жидкости в стволе вертикальной скважины на изменение забойного давления /Д.М.Сагдиева, М.Н.Шамсиев //Материалы конференции «Актуальные проблемы естественных и гуманитарных наук».− Зеленодольск.− 2011.

10. Сагдиева, Д.М. Исследование термогидродинамических процессов в нефтяном пласте /Д.М.Сагдиева, М.Н.Шамсиев //Материалы итоговой образовательно–научной конференции студентов Казанского университета.−Зеленодольск.− 2012.

Приложение

Листинг программы.

```
unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, TeEngine, Series, ExtCtrls, TeeProcs, Chart;
type
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    SaveDialog1: TSaveDialog;
    Button2: TButton;
    Edit1: TEdit;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
Procedure Progonka();
Procedure Temperature();
Procedure Setka();
var
  Form1: TForm1;
  G:TextFile;
  Pres, Temp, Presn, Tempn, u, r, A, B, C, F, Alf, Bet, Tz, Pz: array of real;
  Rk, tau, Pk, Tk, k, mu, beta, Cp, Cg, rho, rc, h, D, Q, Y, eps, eta: real;
```

```
  const
  Col_x=21;
  Col_t=120;
implementation
{$R *.dfm}
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
i,j:integer;
begin
Setka();
for i:=1 to Col_x do
begin
Pres[i]:=Pk;
Presn[i]:=Pk;
end;
for i:=1 to Col_x do
begin
Temp[i]:=Tk;
Tempn[i]:=Tk;
end;
Pz[0]:=Pk;
Tz[0]:=Tk;
for j:=1 to Col_t do
  begin
  Edit1.Text:=IntToStr(j);
  Progonka();
  Temperature();
  Pz[j]:=Pres[1];
```

```
  Tz[j]:=Temp[1];
  for i:=1 to Col_x do
     begin
     Presn[i]:=Pres[i];
     Tempn[i]:=Temp[i];
     end;
  end;
end;
procedure Progonka();
var i:integer;
begin
for i:=1 to Col_x do
    begin
    A[i]:=(1e-4)*(k/(exp(2*u[i])*mu*h*h));
    B[i]:=(1e-4)*(k/(exp(2*u[i])*mu*h*h));
    C[i]:=(1e-4)*((-2*k)/(exp(2*u[i])*mu*h*h))-(beta/tau);
    F[i]:=(-beta/tau)*Presn[i];
    end;
Alf[2]:=((1e-4)*(2*pi*k*Y)/(h*mu))/((D/tau)+((1e-4)*(2*pi*k*Y)/(h*mu)));
Bet[2]:=(-Q+(D/tau)*Presn[1])/((D/tau)+((1e-4)*(2*pi*k*Y)/(h*mu)));
  for i:=2 to Col_x-1 do
    begin
    Alf[i+1]:=-B[i]/(A[i]*Alf[i]+C[i]);
    Bet[i+1]:=(F[i]-A[i]*Bet[i])/(A[i]*Alf[i]+C[i]);
    end;
Pres[Col_x]:=Pk;
for i:=Col_x-1 downto 1 do
    Pres[i]:=Alf[i+1]*Pres[i+1]+Bet[i+1];
end;
```

```
procedure Temperature();
var i:integer;
begin
Temp[Col_x]:=Tk;
for i:=Col_x-1 downto 1 do
   begin
   Temp[i]:=((Temp[i+1]+(eps*(Pres[i+1]-Pres[i])/h))*
*((1e-4)*(rho*Cg*(k/mu)*(1/exp(2*u[i]))*((Pres[i+1]-
-Pres[i])/(h*h))))+(eta*Cg*rho*(Pres[i]-Presn[i])/tau))/
/((Cp/tau)+((1e-4)*(rho*Cg*(k/mu)*(1/exp(2*u[i]))*((Pres[i+1]-Pres[i])/(h*h)))))+
+Tempn[i]*(Cp/tau)/((Cp/tau)+((1e-4)*(rho*Cg*(k/mu)*(1/exp(2*u[i]))*((Pres[i+1]-
-Pres[i])/(h*h)))));
   end;
end;
Procedure Setka();
var
i:integer;
begin
u[1]:=ln(rc);
u[Col_x]:=ln(Rk);
h:=(u[Col_x]-u[1])/(Col_x-1);
for i:=2 to Col_x-1 do
  begin
  u[i]:=u[i-1]+h;
  end;
for i:=1 to Col_x do
  begin
  r[i]:=exp(u[i]);
```

```
  end;
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
var i:integer;
begin
SetLength(Pres,Col_x+1);
SetLength(Temp,Col_x+1);
SetLength(Presn,Col_x+1);
SetLength(Tempn,Col_x+1);
SetLength(u,Col_x+1);
SetLength(r,Col_x+1);
SetLength(A,Col_x+1);
SetLength(B,Col_x+1);
SetLength(C,Col_x+1);
SetLength(F,Col_x+1);
SetLength(Alf,Col_x+1);
SetLength(Bet,Col_x+1);
SetLength(Pz,Col_t+1);
SetLength(Tz,Col_t+1);
rc:=0.1;
Rk:=100;
tau:=3600;
Pk:=100;
Tk:=300;
mu:=10;
rho:=850;
beta:=0.0001;
Cp:=2700000;
Cg:=1800;
```

```
k:=0.01;
D:=1;
Q:=0.00035;
Y:=10;
eps:=0.3;
eta:=0.014;
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
var i,j:integer;
begin
if SaveDialog1.Execute then
  begin
  AssignFile(G, SaveDialog1.FileName);
  Rewrite(G);
  for j:=0 to Col_t do writeln(G
                                ,j:5
                                ,(Tz[j]-Tk):12:5
                                ,((Pk-Pz[j]))/10:12:5
                               );
   CloseFile(G);
  end;
end;
end.
```