У Т В Е Р Ж Д А Ю

____

______________/ /

«____»______________2014 г.

ОТЧЕТ

по теме:

«ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН»

Этап 1: Численное моделирование трехмерных задач тепломассопереноса при фильтрации к горизонтальной скважине.

Зав.каф математики и экономической информатики К(П)ФУ,

проф. Марданов Р.Ш.

Казань, 2014

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель:

Зав.каф математики и экономической
информатики К(П)ФУ,
Проф. Марданов Р.Ш.

Ответственный исполнитель:

зав.лаб. ИММ КазНЦ РАН,
проф., д.т.н. Хайруллин М.Х

Исполнители:

Директор ИЭиФ К(П)ФУ
Проф. Валитов Ш.М.

И.о. зав.кафедрой математики и механики
филиала К(П)ФУ, г.Зеленодольск
д.т.н. Шамсиев М.Н.

с.н.с. ИММ КазНЦ РАН
к.ф.-м.н. Абдуллин А.И.

Реферат

Отчёт – стр.20, рис. 8, табл. 1.

Ключевые слова: термогидродинамические исследования, горизонтальная скважина, тепломассоперенос, кривая изменения температуры, проницаемость.

Построена математическая модель тепломассопереноса в системе «пласт – горизонтальная скважина». Исследованы термогидродинамические процессы в стволе горизонтальной скважины и в нефтяном пласте.

Содержание

Введение

В данной работе предлагается математическая модель тепломассопереноса в нефтяном пласте при фильтрации к горизонтальной скважине.

На основе проведенных термогидродинамических исследований в пласте установлено, что изменение температуры в стволе горизонтальной скважины зависит от калориметрического эффекта, связанного с температурой поступающего в скважину пластового флюида и конвективного тепломассопереноса в стволе ГС.

Список обозначений:

p_1,– давление в скважине,

T_1 – температура в скважине,

p_2,– давление в скважине,

T_2 – температура в скважине,

$\mathbf{w}$ – скорость фильтрации в окрестности скважины,

$\boldsymbol{v}$ – скорость флюида в стволе ГС,

ψ – коэффициент гидравлического сопротивления,

r_c – радиус скважины,

L – длина ГС,

S_c – поверхность ГС,

α – коэффициент теплопередачи,

C_p – коэффициент удельной теплоемкости флюида,

ρ – плотность,

t_{exp} – время работы скважины

Q_0 – дебит скважины на поверхности,

C – коэффициент влияния объема ствола скважины,

S – площадь затрубного пространства,

γ – удельный вес флюида,

p_2 – давление в пласте,

T_2 – температура в пласте,

$\boldsymbol{k}$ – тензор проницаемости,

μ – динамическая вязкость,

β^* – упругоемкость пласта,

m – пористость,

C_n – коэффициент объемной теплоемкости пласта,

ε – коэффициента Джоуля-Томсона,

λ – теплопроводность пласта,

η – коэффициент адиабатического охлаждения,

n – единичный вектор нормали.

1. Численное моделирование трехмерных задач тепломассопереноса при фильтрации к горизонтальной скважине

Возрастающий интерес к проблемам термогидродинамических исследований в системе «нефтяной пласт – горизонтальная скважина» вызван необходимостью решения практических задач нефтедобычи из месторождений с трудноизвлекаемыми запасами [6]. Комплексное изучение термогидродинамических процессов складывается из следующих разделов:

- создание глубинной измерительной аппаратуры и разработка методики термогидродинамических исследований в скважинах;
- термогидродинамика нефтегазового потока в пласте и скважине;
- исследование начального, невозмущенного геотермического поля нефтяного месторождения.

Информация о термогидродинамических процессах, происходящих в нефтяном месторождении, может быть получена путем глубинных измерений температуры и давления в стволе скважины. Изменение температуры в стволе скважины является интегральным показателем термогидродинамических процессов, происходящих как в пластовом объекте, так и в самой скважине. Анализ термогидродинамических исследований используются для мониторинга и оптимизации режима работы скважины, с помощью температурных данных в горизонтальной скважине можно диагностировать местоположение низкопроницаемых включений и строить профиль притока [10, 11].

1.1 Математическая модель тепломассопереноса в системе «нефтяной пласт – горизонтальная скважина»

Математическое моделирование распределения температуры и давления флюида по стволу скважины связано с определением поля давления, скорости потока и температуры в пластовом объекте. Характерные времена перераспределения давления в пластовом объекте и в стволе ГС сильно различаются. Этот факт при исследовании термогидродинамических процессов в стволе ГС позволяет перейти от нестационарной модели к квазистационарной. Поэтому для описания движения флюида в стволе ГС используются квазистационарные уравнения неразрывности и изменения количества движения, а в многопластовом объекте уравнение нестационарной фильтрации. Процессы теплопереноса в системе «нефтяной пласт – горизонтальная скважина» являются нестационарными.

Из интегральных законов сохранения массы, импульса и энергии [2, 3, 7] с учетом присоединенной массы получим систему дифференциальных уравнений, описывающую процесс тепломассопереноса в стволе горизонтальная скважина:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dx} = -\frac{2\mathbf{w}}{r_c}, \; 0 < x \le L, \tag{1.1}$$

$$-\frac{dp_1}{dx} = \rho\frac{d\left(v^2\right)}{dx} + \frac{\pi}{4r_c}\psi\rho\boldsymbol{v}|\boldsymbol{v}|, \; 0 < x \le L, \tag{1.2}$$

$$-\frac{\partial T_1}{\partial t} + v\left(\frac{\partial T_1}{\partial x} + \varepsilon\frac{dp_1}{dx}\right) = \frac{2\left(\alpha_{mp} - \boldsymbol{w}\rho C_p\right)}{\rho C_p r_c}\left(T_2|_{S_c} - T_1\right), \; 0 < x \le L, \; 0 < t \le t_{\exp}, \tag{1.3}$$

где p_1, T_1 – давление и температура в скважине соответственно, $\mathbf{w}$ – скорость фильтрации в окрестности скважины, $\boldsymbol{v}$ – скорость флюида в стволе ГС, ψ – коэффициент гидравлического сопротивления, r_c – радиус скважины, L – длина ГС, S_c – поверхность ГС, α – коэффициент теплопередачи, C_p – коэффициент удельной теплоемкости флюида, ρ – плотность, t_{exp} – время работы скважины. Квазистационарная задача теплообмена между потоком флюида в стволе скважины и горными породами была сформулирована в работе [9], впоследствии подобный подход к исследованию температурного режима вертикальных скважин использовался довольно широко [3,11].

Для описания нестационарной неизотермической фильтрации жидкости к ГС в многопластовом объекте (рис. 1.1) используется следующая система уравнений в частных производных [1, 8]:

$$\beta^* \frac{\partial p_2}{\partial t} = \nabla\left(\frac{\mathbf{k}}{\mu}\nabla p_2\right), \tag{1.4}$$

$$C_{\text{n}} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \rho C_p \frac{\mathbf{k}}{\mu}\nabla p_2 \left(\nabla T_2 + \varepsilon \nabla p_2\right) + \nabla(\lambda \nabla T_2) + m\rho C_p \eta \frac{\partial p_2}{\partial t},$$

$$(x, y, z) \in V,\ 0 < t \le t_{\text{exp}}, \tag{1.5}$$

с начальными

$$p_2(x, y, z, t_0) = P_k,\ T_2(x, y, z, t_0) = T_k \tag{1.6}$$

и граничными условиями

$$p_2\big|_{\partial V_2} = P_k,\ T_2\big|_{\partial V_2} = T_k, \tag{1.7}$$

$$(\mathbf{w}, \mathbf{n})\big|_{\partial V_1} = 0,\ (q, \mathbf{n})\big|_{\partial V_1} = 0, \tag{1.8}$$

$$-\lambda(\nabla T_2, \mathbf{n}) = 2\left(\alpha_{mp} - \mathbf{w}\rho C_p\right)\left(T_2 - T_1\right), (x, y, z) \in S_c, \tag{1.9}$$

$$\int_{S_c} (\mathbf{w}, \mathbf{n}) d\sigma = Q(t), \tag{1.10}$$

где $Q(t) = Q_0 + C\frac{\partial p_2}{\partial t}$, Q_0 – дебит скважины на поверхности, $C = S/\gamma$ – коэффициент влияния объема ствола скважины, S – площадь затрубного пространства, γ – удельный вес флюида, p_2, T_2 – давление и температура в пласте, $\mathbf{k}$ – тензор проницаемости, μ – динамическая вязкость, β^* – упругоемкость пласта, m – пористость, C_n – коэффициент объемной теплоемкости пласта, ε – коэффициента Джоуля-Томсона, λ –

теплопроводность пласта, η – коэффициент адиабатического охлаждения, $\mathbf{n}$ – единичный вектор нормали, $\mathbf{w} = -\frac{\mathbf{k}}{\mu}\nabla p_2$ – скорость фильтрации в пласте. Для вычисления притока в условии (1.10) давление на поверхности ГС корректируется в зависимости от давления в стволе скважины.

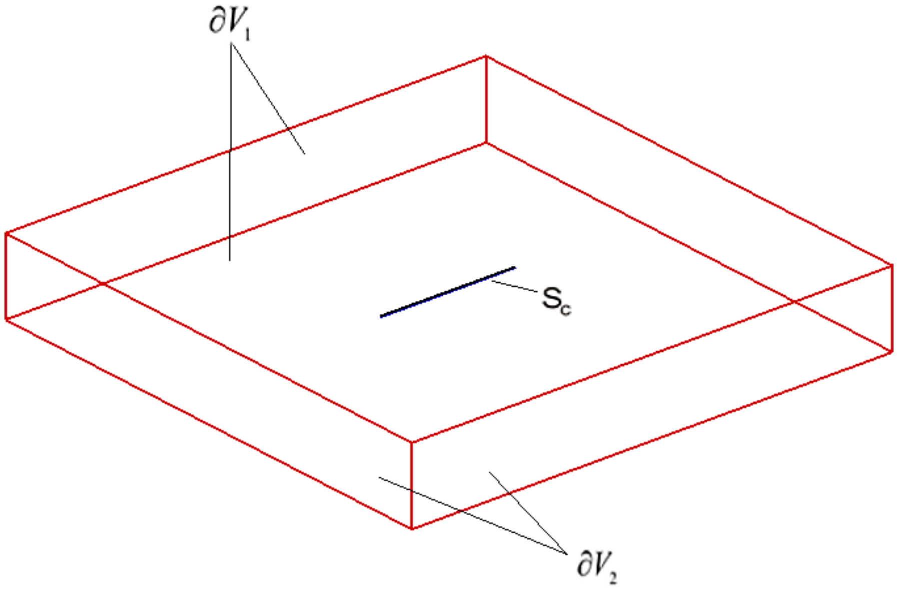

Рис. 1.1. Схема ГС

(S_c– поверхность ГС, ∂V_1 – кровля и подошва пласта, ∂V_2 – боковая поверхность пласта).

Предлагаемый метод решения краевой задачи (1.1)-(1.10) основан на сопряжении внешней (в пласте) и внутренней (в стволе ГС) задачи. Уравнение (1.9) является условием сопряжения и описывает теплообмен между скважиной и пластом, где температура жидкости в стволе ГС T_1 находится из (1.3). Система (1.1) - (1.10) решается численно с помощью метода конечных разностей [5].

Пласт, представляющий собой двухсвязную область фильтрации, покрывается неравномерной конечно-разностной сеткой (рис. 2). В области наибольших градиентов (призабойная зона) производится сгущение сетки с помощью логарифмического преобразования координат по осям OY, OZ. Вдоль горизонтального ствола по оси OX проводится локальное измельчение сетки. Для конечно-разностной аппроксимации конвективного члена в уравнении (1.5) используется процедура взвешивания «вверх по потоку», а для кондуктивного сохраняется симметричное взвешивание.

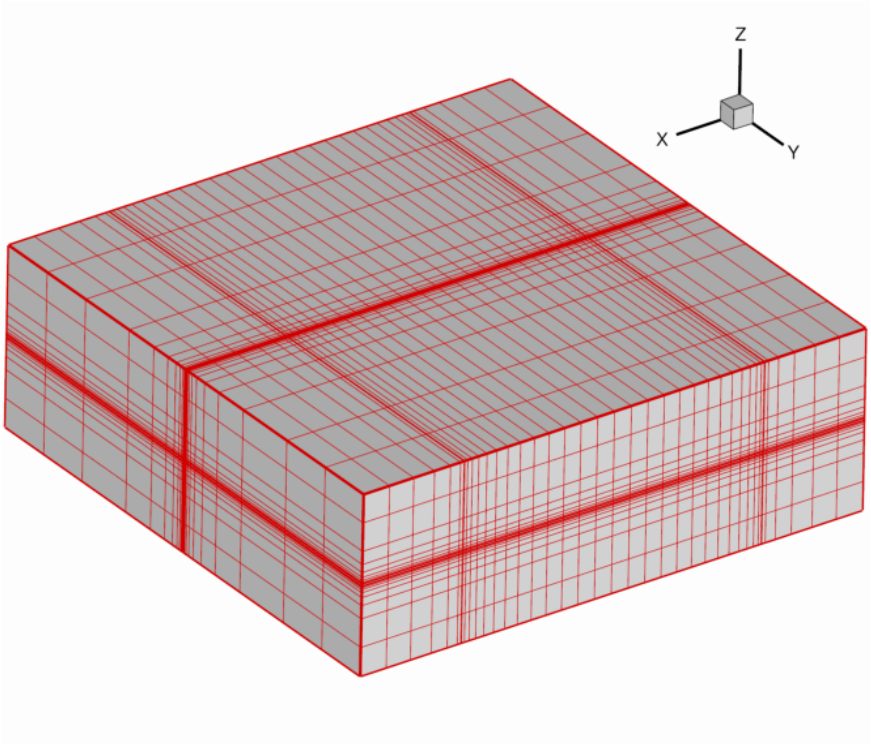

Рис. 1.2. Сеточная модель пласта.

Для дискретизации системы дифференциальных уравнений (1.1) - (1.10) вводятся в области $\Omega = \{x,y,z,t : (x,y,z) \in V, 0 \le t \le t_{exp}\}$ сетки узлов $\omega_h=\{x_i,y_j,z_k: \ 1\le i\le N_x, \ 1\le j\le N_y, \ 1\le k\le N_z\}$ и $\omega_\tau=\{t_n: \ 1\le n\le N_\tau\}$. Полагается $p_1(x_i)=p_{1,i}$, $v_1(x_i)=v_{1,i}$, $T_1(x_i,t_n)=T^n_{1,i}$, $p_2(x_i,y_j,z_k, t_n)=p^n_{2,ijk}$, $T_2(x_i,y_j,z_k, t_n)=T^n_{2,ijk}$.

Определим разностные производные

$$\Lambda_{1,l}(\zeta_s) = \frac{\zeta_s - \zeta_{s-1}}{h_{ls-1}}, \Lambda_{2,l}(\zeta_s) = \frac{\zeta_{s+1} - \zeta_s}{h_{ls}},$$

$$\Delta_{h,l}[\gamma_l](\zeta) = \frac{1}{\hbar_{ls}}\left(\gamma_{l,s+\frac{1}{2}}\Lambda_{2,l}(\zeta) - \gamma_{l,s-\frac{1}{2}}\Lambda_{1,l}(\zeta)\right),$$

$$\Delta^*_{h,l}(\zeta) = \theta_l^s w_l^{s-1}\Lambda_1(\zeta) - (1-\theta_l^s)w_l^s\Lambda_2(\zeta),$$

$$\Delta_\tau(\zeta^{n+1}) = \frac{\zeta^{n+1} - \zeta^n}{\tau_n}.$$

Тогда дискретный аналог краевой задачи (1.1) - (1.10) можно записать в операторном виде:

$$\Lambda_{1,x} v_i = -\frac{2w_i}{r_c}, \qquad (2.1)$$

$$-\Lambda_{1,x} p_{1i} = -\rho(v_i + v_{i-1})\Lambda_{1,x} v_i + \frac{1}{4r_c}\psi\rho v_i |v_i|, \qquad (2.2)$$

$$-\Delta_\tau T_{1i}^{n+1} + v_i(\Lambda_{1,x} T_{1i}^{n+1} + \varepsilon\Lambda_{1,x} p_{1i}) = \frac{2(\alpha_{mp} - w_i\rho C_p)}{\rho C_p r_c}(\tilde{T}_{2i}^{n+1} - T_{1i}^{n+1}), \qquad (2.3)$$

$$\left[-\mu\beta^*\Delta_\tau + \Delta_{h,x}(a_x) + \Delta_{h,y}(a_y) + \Delta_{h,z}(a_z)\right] p_{2,ijk}^{n+1} = 0, \qquad (2.4)$$

$$\left[-C_n\Delta_\tau + \rho C_p(\Delta^*_{h,x} + \Delta^*_{h,y} + \Delta^*_{h,z}) - \Delta_{h,x}(\lambda_x) - \Delta_{h,y}(\lambda_y) - \Delta_{h,z}(\lambda_z)\right] T_{2,ijk}^{n+1} +$$

$$+ \left[\rho C_p(\Delta^*_{h,x} + \Delta^*_{h,y} + \Delta^*_{h,z}) - m\rho C_p\eta\Delta_\tau\right] p_{2,ijk}^{n+1} = 0, \qquad (2.5)$$

где $\tilde{T}_{2i}^{n+1} = T_{2ijk}^{n+1}(ijk \in I_c)$– значение температуры в скважине находится из (2.5),

$$a_{l,s\pm\frac{1}{2}} = -\frac{k_{ls} + k_{ls\pm 1}}{2},$$

$$\lambda_{l,s\pm\frac{1}{2}} = -\frac{\lambda_{ls} + \lambda_{ls\pm1}}{2},$$

$$\theta_l^s = \frac{1 + sign\ w_l^{s-1}}{2},$$

$$h_{ls} = l_{s+1} - l_s,$$

$$\theta\hbar_{ls} = \frac{h_{ls} + h_{ls-1}}{2},$$

$$\tau_n = t_{n+1} - t_{n+1}, l = \begin{cases} x, s = i; \\ y, s = j; \\ z, s = k. \end{cases}$$

Дискретные аналоги начальных и граничных условий (1.6)-(1.7):

$$p_{2,ijk}^0 = 0,\ T_{2,ijk}^0 = T_k,$$

$$p_{2,ijk}^{n+1} = p_k,\ T_{2,ijk}^{n+1} = T_k, (ijk \in I_{V_2}).$$

Для аппроксимации граничных условий (1.8) используется метод «отражения». Вводятся фиктивные плоскости узлов, и полагается $p_{2,ij0} = p_{2,ij2}$, $p_{2,ijNz+1} = p_{2,ijNz-1}$, $T_{2,ij0} = T_{2,ij2}$, $T_{2,ijNz+1} = T_{2,ijNz-1}$. Неизвестные значения $p_{2,ij0}$, $p_{2,ijNz+1}$, $T_{2,ij0}$, $T_{2,ijNz+1}$ с помощью данных формул исключаются из разностных уравнений (2.4) и (2.5), записанных для узлов ($ij1$) и (ijN_z) соответственно.

Дискретные аналоги граничных условий (1.9)-(1.10):

$$[\Delta_{h,x}(\lambda_x) + \Delta_{h,y}(\lambda_y) + \Delta_{h,z}(\lambda_z)]T_{2,ijk}^{n+1} = -2(\alpha_{mp} - w_{ijk}\rho C_p)(T_{2,ijk}^{n+1} - T_{1,i}^{n+1}), (ijk \in I_c),$$

$$\sum_{ijk \in I_c} w_{ijk}\sigma_{ijk} = Q^{n+1},$$

здесь σ – площадь ячейки, перпендикулярной потоку; I_c, I_{V1}, I_{V2} - множество узлов, отнесенных к скважине, боковой границе области фильтрации, кровле и подошве пласта соответственно.

Нелинейная система (2.1)-(2.5) решается итерационно. Для решения систем алгебраических уравнений (2.4)-(2.5) применяются методы подпространств Крылова с предобусловливанием. Проведенный анализ методов решения таких уравнений показал, что наиболее оптимальной является комбинация стабилизированного метода бисопряженных градиентов *BiCGStab* с предобусловливателем *ILU*(0).

2. Исследование термогидродинамических процессов в системе «нефтяной пласт – горизонтальная скважина»

Проводится анализ влияния термодинамических параметров на кривые изменения температуры в стволе скважины.

Рассматривается модельный однородный пористый пласт, который эксплуатируется горизонтальной скважиной. Моделируется пуск скважины с постоянным отбором флюида из пласта. Расчеты проводились при следующих параметрах: $\beta^* = 10^{-4}$ *МПа*$^{-1}$; r_c=0.1 *м*; L = 150 *м*, L_z = 10*м*, L_x=L_y=500*м*; μ=25 *мПа-с*; P_k=15 *МПа*; kx=ky=kz=0.1 *мкм*^{2} ; Q =100 *м*^{3}*/сут*; C=0; T_k = 300°*К*; C_n =1.6·10^6 *Дж/м*^{3}*·К*; C_p =1920 *Дж/кг·К*; ρ=800 *кг/м*^{3}; ε=0.4 *К/МПа*; m=0.1; η=0 *К/МПа*; λ =0.113 *Вт/(м·К)*.

Наибольшее влияние на изменение температуры в пласте оказывают конвективный перенос и эффект адиабатического охлаждения. На рис.2.1, 2.2 приводятся кривые изменения температуры в скважине при различных значениях коэффициента Джоуля-Томсона (рис.2.1: 1 - ε = 0.2; 2 - ε = 0.4 К/МПа) и коэффициента адиабатического охлаждения (рис.2.2: 1 - η = 0; 2 - η = 0.015; 3 - η = 0.03 *К/МПа*).

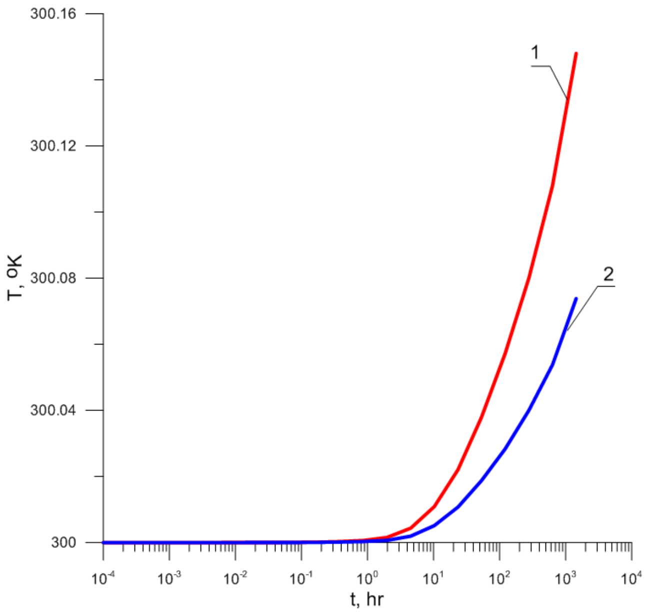

Рис. 2.1. Кривые изменения температуры. ε: 1- 0.4, 2- 0.2 К/МПа.

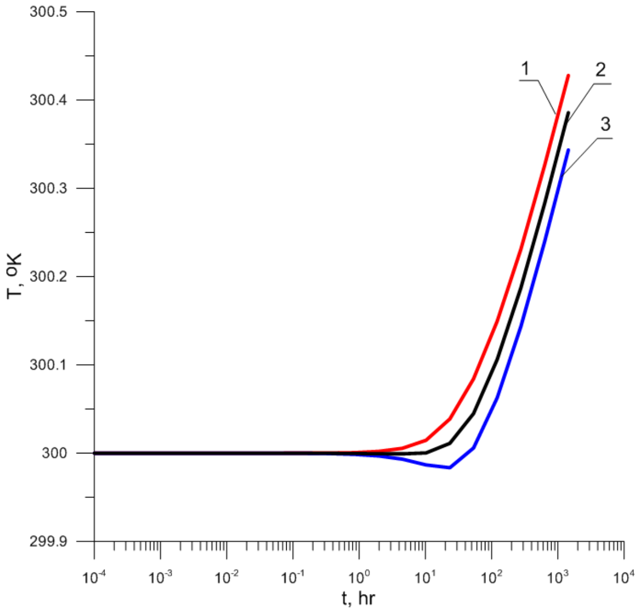

Рис. 2.2. Кривые изменения температуры. η :1 - 0, 2 - 0.015, 3 - 0.03 *К/МПа*.

Из результатов расчетов следует, что более низкие значения величины дроссельного эффекта характеризуются замедлением роста температуры в стволе скважины, а для адиабатического охлаждения характерен изгиб кривой температуры к оси абсцисс «по времени».

Рассматривается модельный неоднородный по проницаемости пласт, вскрытый горизонтальной скважиной. Моделируется работа скважины с дебитом Q = 30 $м^3/сут$. Исходные данные такие же, как и в первом примере, за исключением следующих: ε =0.4 *К/МПа*; η =0 *К/МПа*.

Скважина эксплуатирует пласт с проницаемостью k=0.1мкм^2, имеющий низкопроницаемое включение k=0.01*мкм*^{2}. Проницаемость пласта в этом случае аппроксимируется кусочно-постоянной функцией.Кривые изменения температуры и давления регистрируются глубинными измерительными приборами (манометры-термометры), которые расположены в стволе ГС (рис.2.3).

На рис.2.4 приводятся кривые изменения температуры, зарегистрированные приборами №№1,2,3. На рис.2.5 приводится распределение притока по стволу скважины. Кривая (1) описывает приток жидкости при наличии зон неоднородности из примера 2, кривая (2) – в случае однородного пласта.

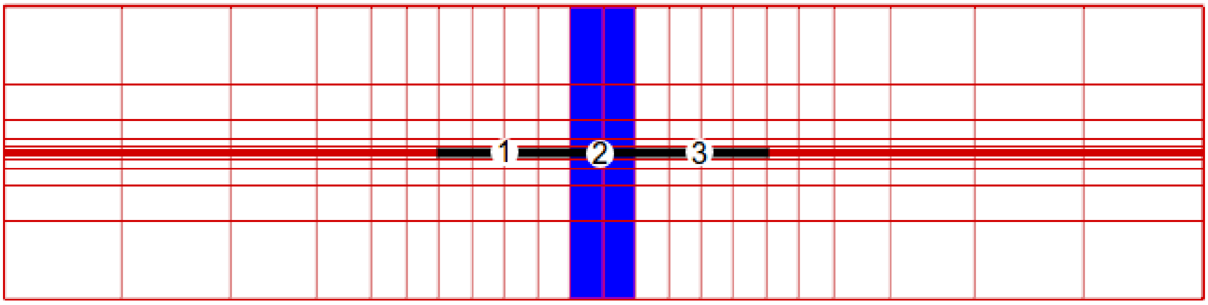

Рис. 2.3. Зоны неоднородности пласта и места установки приборов.

На рис.2.3 приводится контур поля температуры вдоль ствола горизонтальной скважины, когда продуктивный пласт с проницаемостью k=0.05*мкм*^{2} имеет низкпроницаемые включения k=0.005*мкм*^{2} и зону с более высокой проницаемостью (k=0.5*мкм*^{2}). Как видно на этом рисунке пластовая жидкость при прохождении низкопроницаемой зоны имеет более низкую температуру по сравнению с высоконроницаемыми зонами.

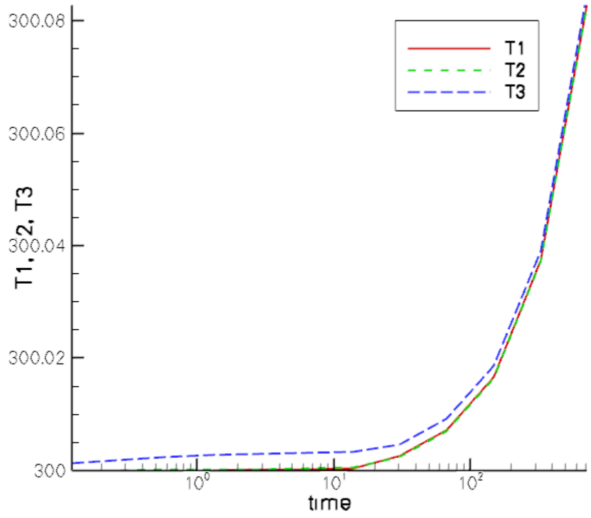

Рис. 2.4. Кривые изменения температуры ($T,^oK$).

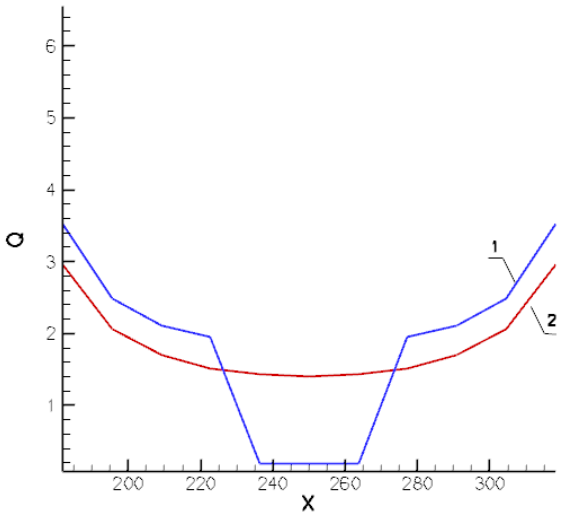

Рис. 2.5. Профиль притока (Q, $м^3$).

Из результатов расчетов следует, что в случае однородного пласта температура в стволе скважины возрастает со временем одинаково во всех точках ствола. Увеличение температуры объясняется смешиванием потока в стволе с притоком флюида к стволу с более высокой температурой (калориметрический эффект). Градиент скорости флюида в стволе ГС не меняется. В случае неоднородного по проницаемости пласта температура в стволе скважины возрастает со временем неодинаково (рис.2.6), т.к.

пластовый флюид поступает из зон с разными фильтрационными свойствами.

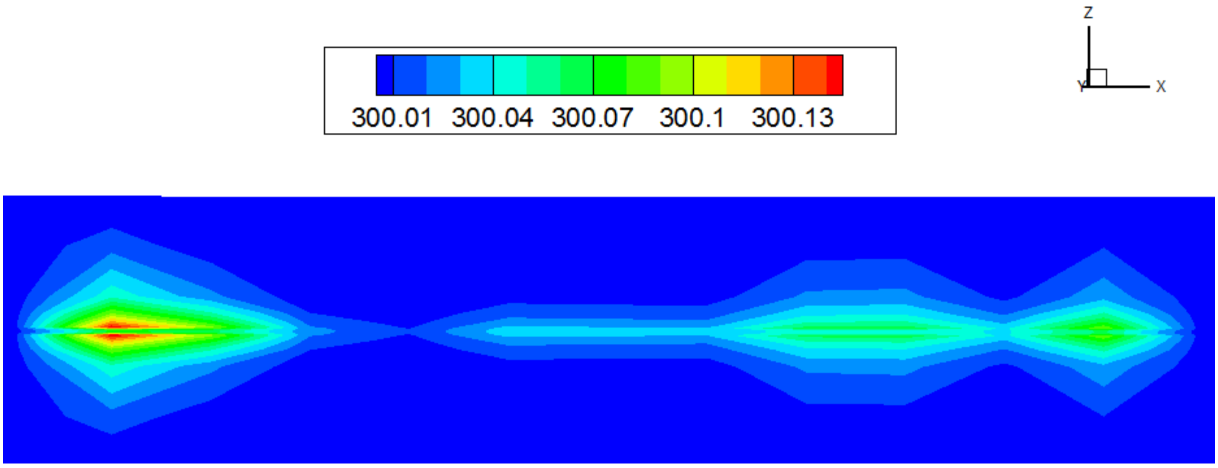

Рис. 2.6. Контур температуры вдоль скважины. Сечение плоскостью OY.

Выводы

Предложена трехмерная математическая модель тепломассопереноса в системе «продуктивный пласт - горизонтальная скважина», в которой учитывается эффект Джоуля-Томсона, адиабатического охлаждения, влияние объема ствола скважины, анизотропия пласта по проницаемости.

Разработан эффективный приближенный численный метод расчета изменения температуры и давления в пористом нефтяном пласте и в стволе ГС после пуска скважины.

Предлагаемый подход может быть использован при решении задач идентификации теплофизических и фильтрационно-емкостных параметров продуктивного пласта.

Литература

1. **Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М.** Подземная гидромеханика. - *М.: Недра, 1993.*-303 с.

2. **Бондарев Э.А., Васильев В.И., Воеводин А.Ф. и др.** Термогидродинамика систем добычи и транспорта газа. *Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1988.* - 272 с.

3. **Васильев О. Ф., Воеводин А. Ф.** О газотермодинамическом расчете потоков в простых и сложных трубопроводах *// Известия сибирского отделения Академии наук СССР, 1968. № 13 Вып. 3.* С. 53 - 62.

4. Патент на изобретение № 2243372. Способ гидродинамических исследований горизонтальных скважин // ***Хисамов Р.С., Муслимов Р.Х., Фархуллин Р.Г., Хайруллин М.Х. и др.*** *– Заявл. №2003133117. – 13.1.2003. – Бюл.№36.*

5. **Самарский А.А., Вабищевич П.Н.** Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. - 784 с.

6. **Хисамов Р.С.** Высокоэффективные технологии освоения нефтяных месторождений. *М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004.* – 628 с.

7. **Чарный И.А.** Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. *М.: Недра, 1975.*¬296 с.

8. **Чекалюк Э.Б.** Термодинамика нефтяного пласта. *М.: Недра, 1965.* - 238 с.

9. **Ramey H.J.** Wellbore heat transmission // *SPE 1961.*

10. **K.Yoshioka, D. Zhu and A.D. Hill.** Interpretation of Temperature and Pressure Profiles Measured in Multilateral Wells Equipped with Intelligent Completions // *SPE 94097, 2005.*

11. **Zhuoyi Li and Ding Zhu.** Predicting Flow Profile of Horizontal Well by Downhole Pressure and Distributed - Temperature Data for Waterdrive Reservoir // *August 2010 SPE Production & Operations.* P. 296 - 304.