

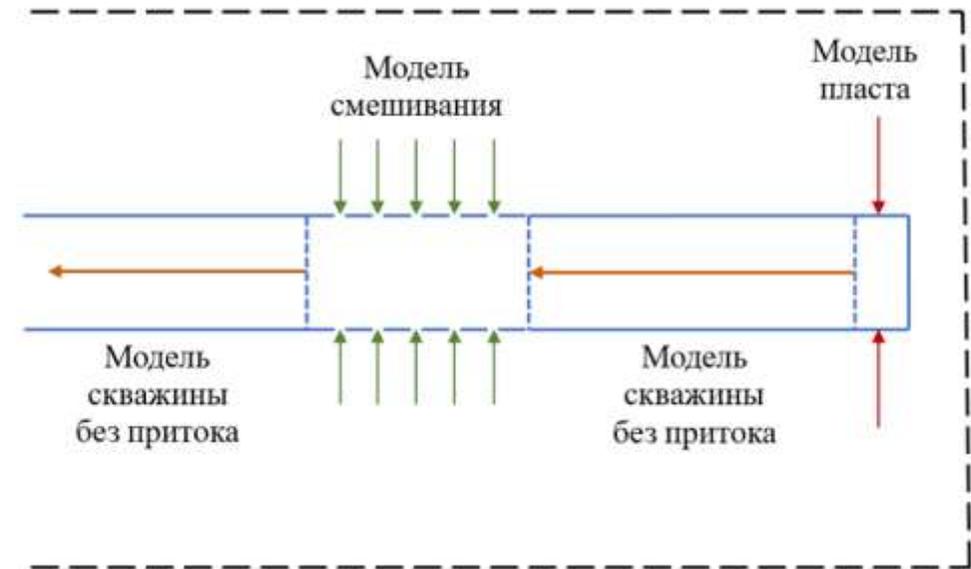
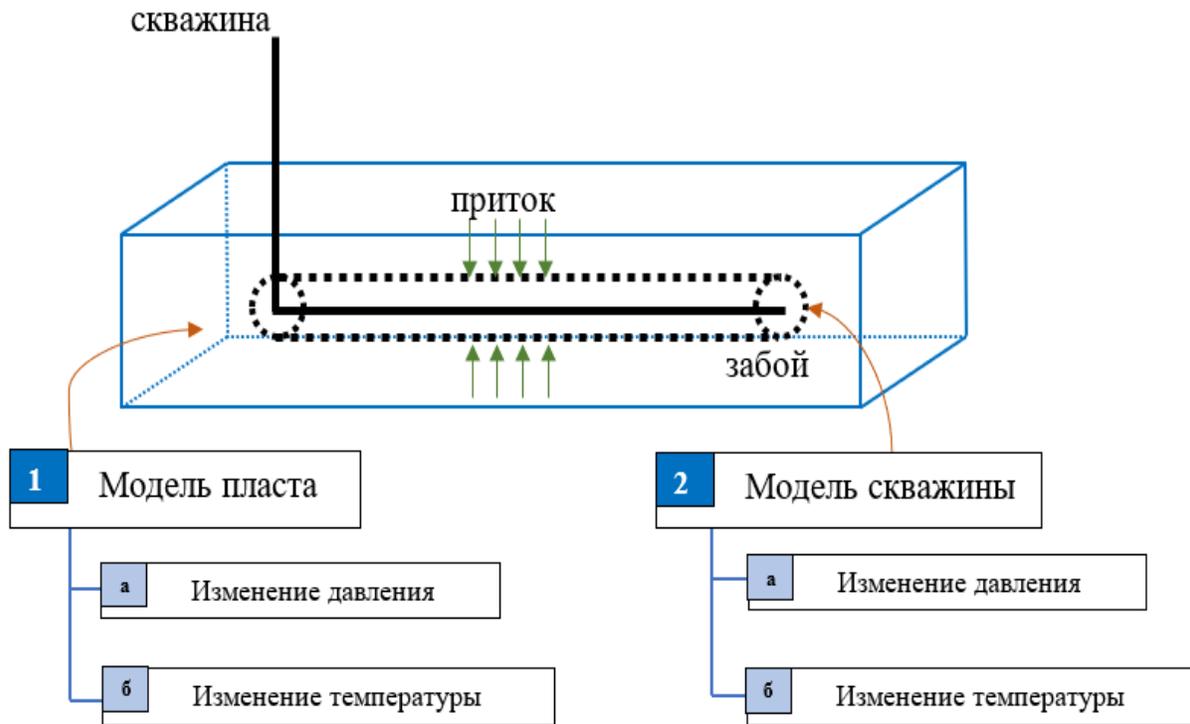
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СИСТЕМЕ ПЛАСТ-СКВАЖИНА

Подготовил студент группы 5040103/20101 Аюпова Г. К.
Научный руководитель: д.ф.-м.н. Кузькин В. А.

Актуальность: при некоторых термодинамических условиях возможны выпадения гидратов, которые вызывают снижение количества добываемого газа. Расчет изменения температуры и давления поможет предсказывать выпадение данных отложений.

Цель: определить изменение температуры, давления и плотности флюида при его течении в пласте и на горизонтальном участке скважины.

Постановка задачи



Аналитическая модель для расчета температуры и давления в пласте. Постановка задачи

Уравнение пьезопроводности

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} \\ p|_{r=r_c} = \phi, \\ p|_{r=R_k} = P_{пл}, \\ p|_{t=0} = P_{пл} \end{array} \right.$$

p – давление, Па

$P_{пл}$ – начальное (пластовое) давление, Па

ϕ – давление на стенке скважины, Па

k – проницаемость пласта, м²

μ – вязкость флюида, Па·с

r_c – радиус ствола скважины, м

R_k – радиус контура питания, м

Уравнение энергии Чекалюка

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{пл} \frac{\partial T}{\partial t} + C_{\phi} v(r, t) \left(\varepsilon \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \eta m C_{\phi} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\lambda_{пл}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ T|_{t=0} = y(r), \\ T|_{r=R_k} = T_0, \\ \lambda_{пл} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_c} = q_0. \end{array} \right.$$

$v(r, t)$ – скорость фильтрации

C_{ϕ} и $C_{пл}$ – объемная теплоемкость флюида и пласта соответственно, Дж/(м³·К)

ε – коэффициент Джоуля-Томсона, К/Па

m – пористость

$\lambda_{пл}$ – теплопроводность пласта, Дж/(с·м·К)

η – адиабатический коэффициент, К/Па

T_0 – температура на контуре питания (температура пласта), К

$y(r)$ – начальный профиль температуры в пласте

q_0 – тепловой поток на стенке скважины

Аналитическая модель для расчета температуры и давления в пласте. Распределение поля давления

Уравнение пьезопроводности в стационарном случае:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0, \\ p|_{r=r_c} = \phi, \\ p|_{r=R_k} = P_{\text{пл}} \end{cases}$$



$$p(r) = P_{\text{пл}} + \frac{P_{\text{пл}} - \phi}{\ln(\tilde{R})} \ln\left(\frac{r}{R_k}\right)$$
$$\tilde{R} = \frac{R_k}{r_c}$$

ϕ – давление на стенке скважины, Па;

k – проницаемость пласта, м²;

μ – вязкость флюида, Па·с;

r_c – радиус ствола скважины, м;

R_k – радиус контура питания, м.

Аналитическая модель для расчета температуры и давления в пласте. Распределение поля температур

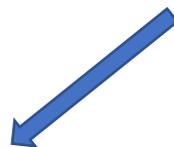
Скорость фильтрации в пласте определяется по линейному закону Дарси:

$$v(r) = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p(r)}{\partial r} \right) = -\frac{k P_{\text{пл}} - \phi}{\mu \ln(\tilde{R}) r} = \frac{a}{r}$$



Распределение давления в пласте:

$$p(r) = P_{\text{пл}} + \frac{P_{\text{пл}} - \phi}{\ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)} \ln\left(\frac{r}{R_k}\right)$$



Уравнение энергии Чекалюка в стационарном случае:

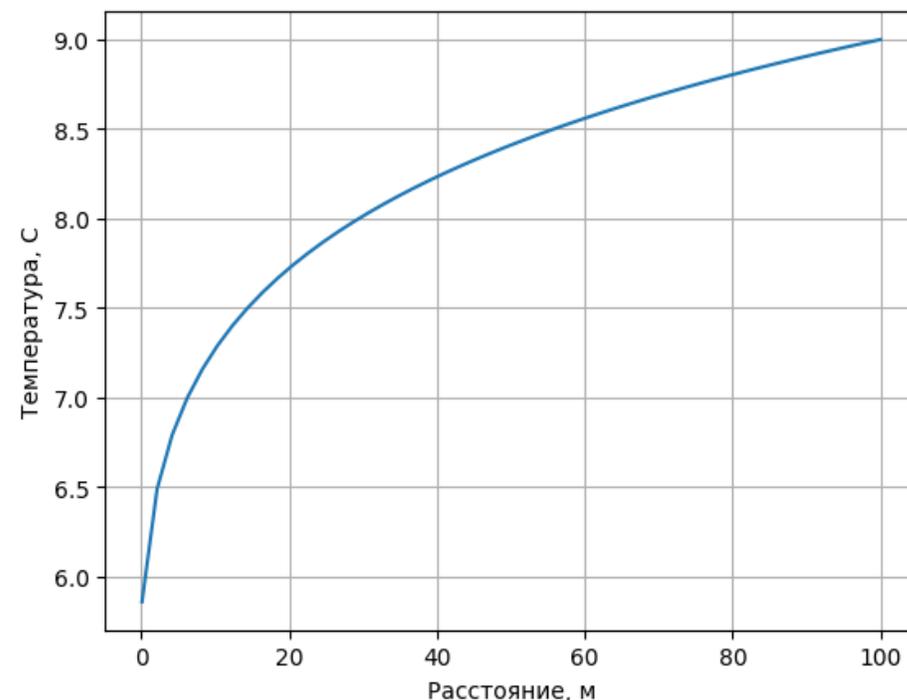
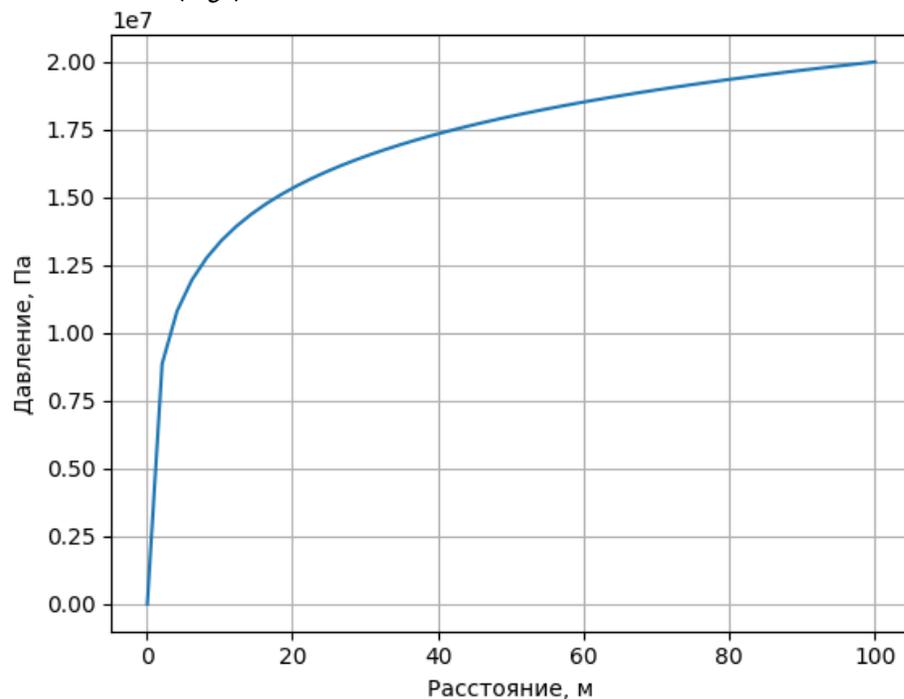
$$\begin{cases} C_\phi v(r) \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - C_\phi \varepsilon v(r, t) \frac{\partial p}{\partial r} \\ T|_{r=R_k} = T_0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_c} = 0 \end{cases}$$



$$T = T_0 - \varepsilon C_1 \left[\frac{\lambda}{a C_\phi} \left(\left(\frac{R_k}{r_c} \right)^{\frac{a C_\phi}{\lambda}} - \left(\frac{r}{r_c} \right)^{\frac{a C_\phi}{\lambda}} \right) + \ln\left(\frac{r}{R_k}\right) \right]$$
$$a = -\frac{k P_{\text{пл}} - \phi}{\mu \ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)}; \quad C_1 = \frac{\phi - P_{\text{пл}}}{\ln\left(\frac{r_c}{R_k}\right)}$$

Аналитическая модель для расчета температуры и давления в пласте. Пример

$$p(r) = P_{\text{пл}} + \frac{P_{\text{пл}} - \phi}{\ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)} \ln\left(\frac{r}{R_k}\right); \quad T = T_0 - \varepsilon C_1 \left[\frac{\lambda}{a C_f} \left(\left(\frac{R_k}{r_c}\right)^{\frac{a C_f}{\lambda}} - \left(\frac{r}{r_c}\right)^{\frac{a C_f}{\lambda}} \right) + \ln\left(\frac{r}{R_k}\right) \right]; \quad a = -\frac{k P_{\text{пл}} - \phi}{\mu \ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)}; \quad C_1 = \frac{\phi(t) - P_{\text{пл}}}{\ln\left(\frac{r_c}{R_k}\right)}$$



$\phi = 0 \text{ Па}$

$k = 10^{-13} \text{ м}^2$

$\mu = 1.03 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$

$r_c = 0.1 \text{ м}$

$R_k = 10 \text{ м}$

$C_\phi = 1.6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$

$\varepsilon = 3 \cdot 10^{-6} \text{ К}/\text{Па}$

$\lambda_{\text{пл}} = 2.8 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м} \cdot \text{К})$

$T_0 = 282.15 \text{ К}$

$P_{\text{пл}} = 20 \cdot 10^6 \text{ Па}$

Аналитическая модель для расчета температуры и давления в скважине. Постановка задачи

**Баланс массы
(уравнение неразрывности):**

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho v_n dS = 0$$



$$S \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial t} \rho dx + (\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1) S = 0$$



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0$$

Баланс импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho v dV + \int_S \rho v v_n dS = \int_V \rho F dV + \int_S P_n dS$$



Гидравлическая формула
Дарси-Вейсбаха:

$$\tau = \frac{\lambda \rho |v| v}{8}$$



$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (p + \rho v^2) = -\rho \frac{\lambda |v| v}{2D} - \rho g \frac{dy}{dx}$$

Баланс энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E dV + \int_S \rho E v_n dS = \int_V \rho F v dV + \int_S P_n v dS + Q_0$$



$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho v \left(E + \frac{p}{\rho} \right) \right) = \pi D q - \rho g v \frac{dy}{dx} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$



Закон Ньютона-Рихмана для теплопроводности:

$$q = \alpha (T_{\text{внеш}} - T)$$



$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho v \left(E + \frac{p}{\rho} \right) \right) = \pi D \alpha (T_{\text{внеш}} - T) - \rho g v \frac{dy}{dx}$$

Уравнения состояния газовой смеси



Уравнения состояния газовой смеси

Уравнение Редлиха-Квонга:

$$p(\rho, T) = \frac{hT\rho}{1 - \delta\rho} - \frac{c\rho^2}{(1 + \delta\rho)T^{0.5}}$$

$$h = \frac{R_0}{M}; \quad M = \sum_1^n \eta_k m_k; \quad \sum_1^n \eta_k = 1$$

$$\delta = \frac{\Omega_b R_0 T_c}{M p_c}; \quad c = \frac{\Omega_a R_0^2 T_c^{2.5}}{M^2 p_c}$$

η_k, m_k — молекулярный вес и доля k -й составляющей смеси газа из n компонентов;

Ω_a, Ω_b — известные константы;

p_c, T_c — критические давление и температура смеси газа;

R_0 — универсальная газовая постоянная.

Причины выбора уравнения Редлиха-Квонга:

1. С большой точностью задают связь давления, плотности и температуры смеси газов в широком диапазоне изменения термобарических величин, включая сверхвысокие давления (больше 20 МПа);
2. Широко используется как для чистых веществ, так и смесей парафиновых углеводородов.

Математическая модель стационарного неизотермического течения газа в скважине

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (p + \rho v^2) = -\rho \frac{\lambda |v|v}{2D} - \rho g \frac{dy}{dx}; \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho v \left(E + \frac{p}{\rho} \right) \right) = \frac{4\alpha(T_{\text{внеш}} - T)}{D} - \rho g v \frac{dy}{dx}; \\ p(\rho, T) = \frac{hT\rho}{1 - \delta\rho} - \frac{c\rho^2}{(1 + \delta\rho)T^{0.5}} \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \rho v = \frac{4Q}{\pi D^2}; \\ \rho v \frac{dv}{dx} = -\frac{dp}{dx} - \rho \frac{\lambda |v|v}{2D}; \\ \rho c_V \frac{dT}{dz} = -T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{4\alpha(T_{\text{внеш}} - T)}{D} + \rho \frac{\lambda |v|v^2}{2D}; \\ p(\rho, T) = \frac{hT\rho}{1 - \delta\rho} - \frac{c\rho^2}{(1 + \delta\rho)T^{0.5}}; \\ x = 0: \quad p = p_{x0}, \quad T = T_{x0} \end{array} \right.$$

Допущения:

1. Процесс стационарный;
2. $-\rho g v \frac{dy}{dx} = \rho g v \cos(\beta) = 0$;
3. Коэффициенты гидравлического сопротивления λ , суммарной теплопередачи α и удельной теплоемкости c_V – постоянные величины.

ρ – плотность газа, кг/м³;
 v – скорость газа, м/с;
 $T_{\text{внеш}}$ – температура пласта, К;
 D – диаметр скважины, м;
 Q – массовый расход газа, кг/с;
 α – суммарный коэффициент теплопередачи, Вт/(К·м²);
 λ – коэффициент гидравлического сопротивления;
 h, c, δ – коэффициенты уравнения состояния

Математическая модель стационарного неизотермического течения газа в скважине. Переход к безразмерным величинам

Итоговая система ДУ в безразмерном виде:

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dz} = F_1(\rho, T) = \frac{f_2 + f_1 f_3 f_T}{1 - f_1 f_\rho - f_1 f_4 f_T} \\ \frac{dT}{dz} = F_2(\rho, T) = f_3 + \frac{f_4 (f_2 + f_1 f_3 f_T)}{1 - f_1 f_\rho - f_1 f_4 f_T} \end{cases}$$

Безразмерные комплексы m_i :

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{p_x}{\rho_x v_x^2} & m_5 &= \frac{p_x}{\rho_x c_v T_x} \\ m_2 &= \frac{\lambda l_x}{2D} & m_6 &= \frac{4l_x \alpha}{c_v D \rho_x v_x} \\ m_3 &= \delta \rho_x & m_8 &= \frac{h \rho_x T_x}{p_x} \\ m_4 &= \frac{\lambda v_x^2 l_x}{2c_v D T_x} & m_9 &= \frac{c \rho_x^2}{p_x T_x^{0.5}} \end{aligned}$$

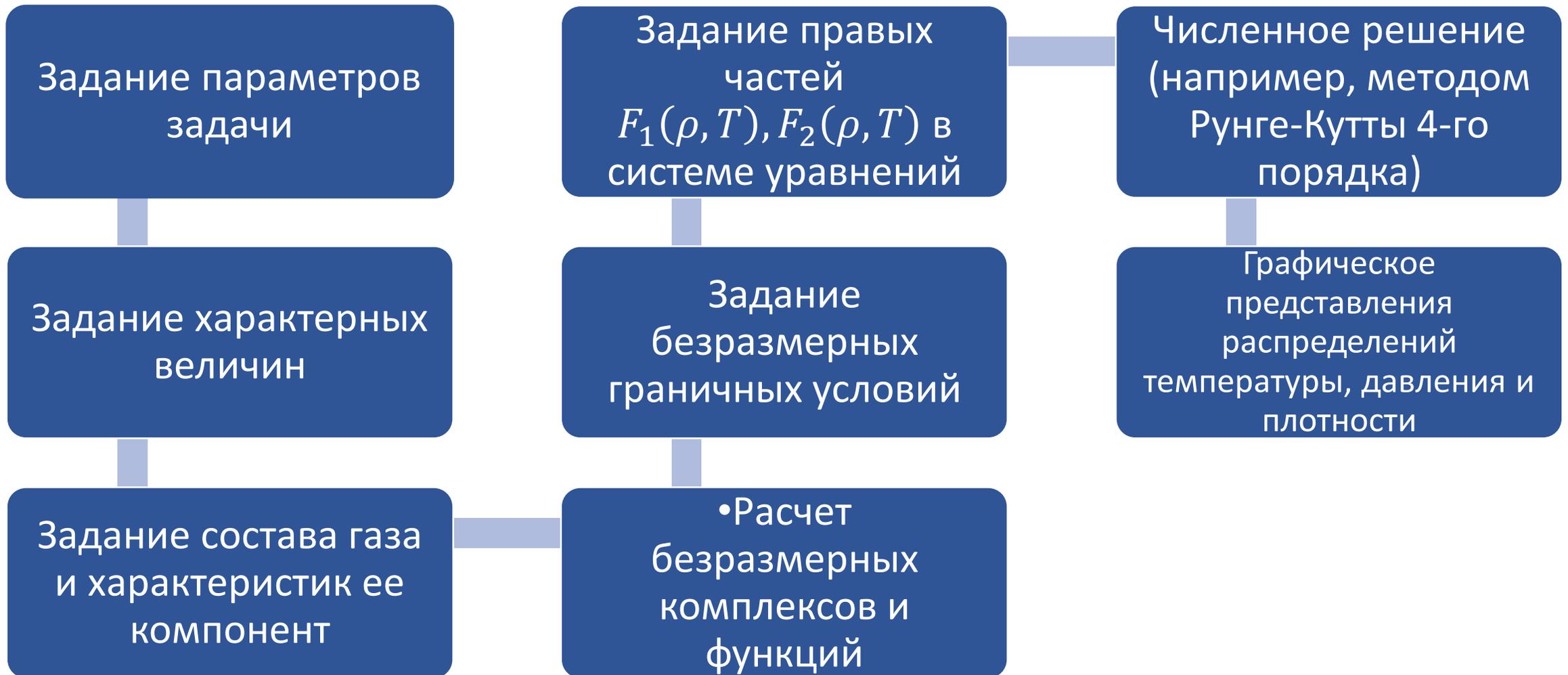
Безразмерные функции f_i :

$$\begin{aligned} f_\rho &= \frac{\partial p}{\partial \rho} = m_8 \frac{T}{(1 - m_3 \rho)^2} - m_9 \frac{\rho(2 + m_3 \rho)}{(1 + m_3 \rho)^2 T^{0.5}}; \\ f_T &= \frac{\partial p}{\partial T} = m_8 \frac{\rho}{(1 - m_3 \rho)} + m_9 \frac{\rho^2}{(1 + m_3 \rho) T^{1.5}}; \\ f_p &= m_8 \frac{\rho T}{(1 - m_3 \rho)} - m_9 \frac{\rho^2}{(1 + m_3 \rho) T^{0.5}}; \\ f_1 &= m_1 \rho^2; & f_2 &= m_2 \rho; \\ f_3 &= \frac{m_4}{\rho^2} + m_6 (T_{plast} - T); & f_4 &= \frac{m_5 T}{\rho^2} f_T \end{aligned}$$

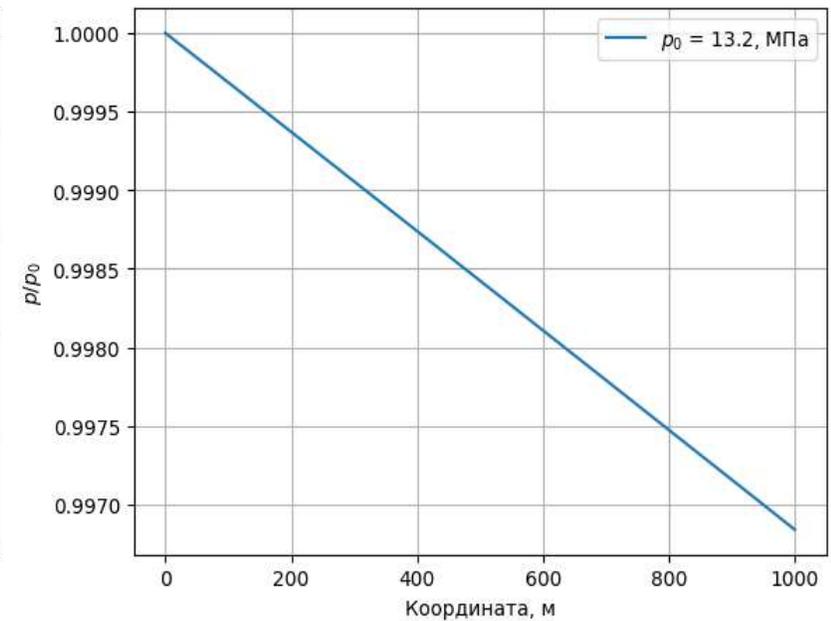
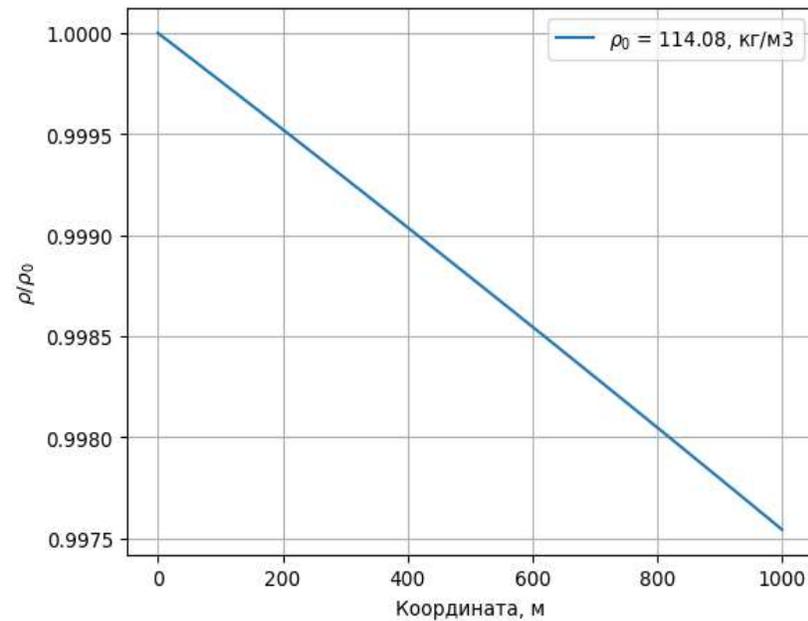
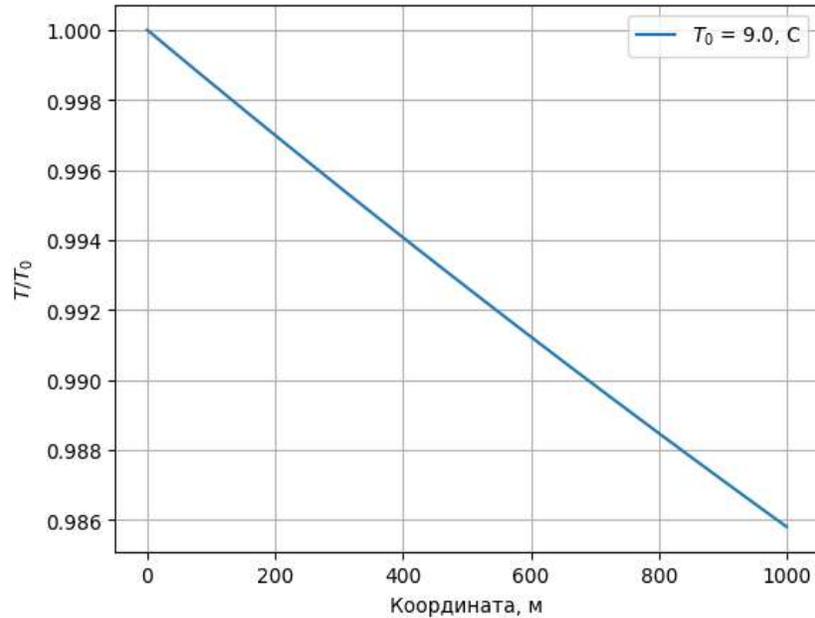
Произвольные параметры:

$p_x, \rho_x, T_x, l_x, u_x$ - характерные давление, плотность, температура, длина и скорость соответственно

Математическая модель стационарного неизотермического течения газа в скважине. Алгоритм



Математическая модель стационарного неизотермического течения газа в скважине. Пример



$Q = 10000 \text{ м}^3/\text{сут}$	$T_{\text{внеш}} = 282.15 \text{ К}$	$L = 1000 \text{ м}$	$h = 519.375 \text{ м}^2/(\text{К}\cdot\text{с}^2)$	$M = 0.016 \text{ кг/моль}$	$p_{x0} = 13.2 \text{ МПа}$	$c_V = 1654.14 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
$\lambda = 0.008756$	$T_c = 190.56 \text{ К}$	$R = 0.1 \text{ м}$	$\delta = 0.00187312 \text{ м}^3/\text{кг}$	$\rho_{x0} = 114.08 \text{ кг/м}^3$	$p_c = 4.5779 \text{ МПа}$	$\alpha = 14 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$
$T_{x0} = 283.15 \text{ К}$	$T_x = 283.15 \text{ К}$	$l_x = 1000 \text{ м}$	$c = 12626.731 \text{ м}^5\cdot\text{К}^{0.5}/(\text{с}^2\cdot\text{кг})$	$\rho_x = 129.362 \text{ кг/м}^3$	$p_x = 15 \text{ МПа}$	$v_x = 3.68 \text{ м/с}$

Аналитическая модель смешивания газа в интервалах притока. Постановка задачи

Баланс масс:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho v_n dS = 0$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial t} \rho dx + (\rho(x_2)v(x_2) - \rho_1 v_1) = \frac{1}{S_{\text{СКВ}}} \int_{x_1}^{x_2} \pi D \eta \rho_2 v_2 dx$$

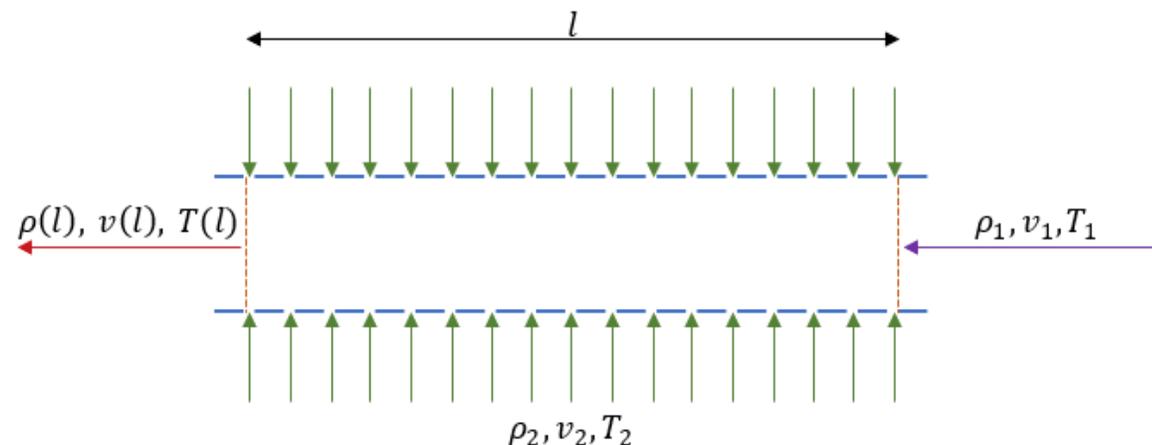
$$\eta = \frac{S_{\text{пер}}}{S} = \frac{n D_{\text{пер}}^2}{4 D l}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = \frac{4 \eta}{D} \rho_2 v_2$$

Баланс энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E dV + \int_S \rho E v_n dS = Q_0$$

$$\frac{\partial(c_V \rho T S_{\text{СКВ}})}{\partial t} = - \frac{\partial(c_V \rho T v S_{\text{СКВ}})}{\partial x} + c_V \rho_2 T_2 \pi D l \eta v_2$$



- ρ_1 – плотность газа, протекающего в скважине, кг/м³;
- ρ_2 – плотность газа, втекающего через перфорации скважины, кг/м³;
- v_1 – скорость газа, протекающего в скважине, м/с;
- v_2 – скорость, с которой газ втекает в скважину через перфорации, м/с;
- T_1 – температура газа в скважине, К;
- T_2 – температура, втекающего газа через перфорации, К;
- D – диаметр скважины, м;
- $D_{\text{пер}}$ – диаметр одной перфорации, м;
- l – длина участка с перфорациями, м;
- n – количество перфораций на длине l ;
- $S_{\text{СКВ}}$ – площадь поперечного сечения скважины, м²

Аналитическая модель смешивания газа в интервалах притока. Постановка задачи

Баланс масс:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho v_n dS = 0$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial t} \rho dx + (\rho(x_2)v(x_2) - \rho_1 v_1) = \frac{1}{S_{\text{СКВ}}} \int_{x_1}^{x_2} \pi D \eta \rho_2 v_2 dx$$

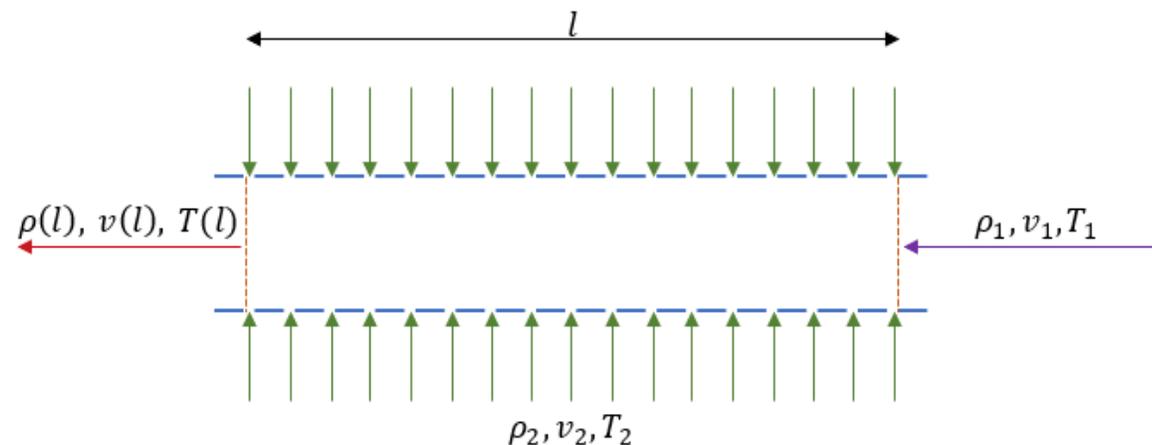
$$\eta = \frac{S_{\text{пер}}}{S} = \frac{nD_{\text{пер}}^2}{4Dl}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = \frac{4\eta}{D} \rho_2 v_2$$

Баланс энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E dV + \int_S \rho E v_n dS = Q_0$$

$$\frac{\partial(c_V \rho T S_{\text{СКВ}})}{\partial t} = - \frac{\partial(c_V \rho T v S_{\text{СКВ}})}{\partial x} + c_V \rho_2 T_2 \pi D l \eta v_2$$



Баланс импульса:

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v(l)$$

$$v(l) = \frac{Q_1 \rho_1 v_1}{Q_1 \rho_1 + S_{\text{пер}} \rho_2 v_2}$$

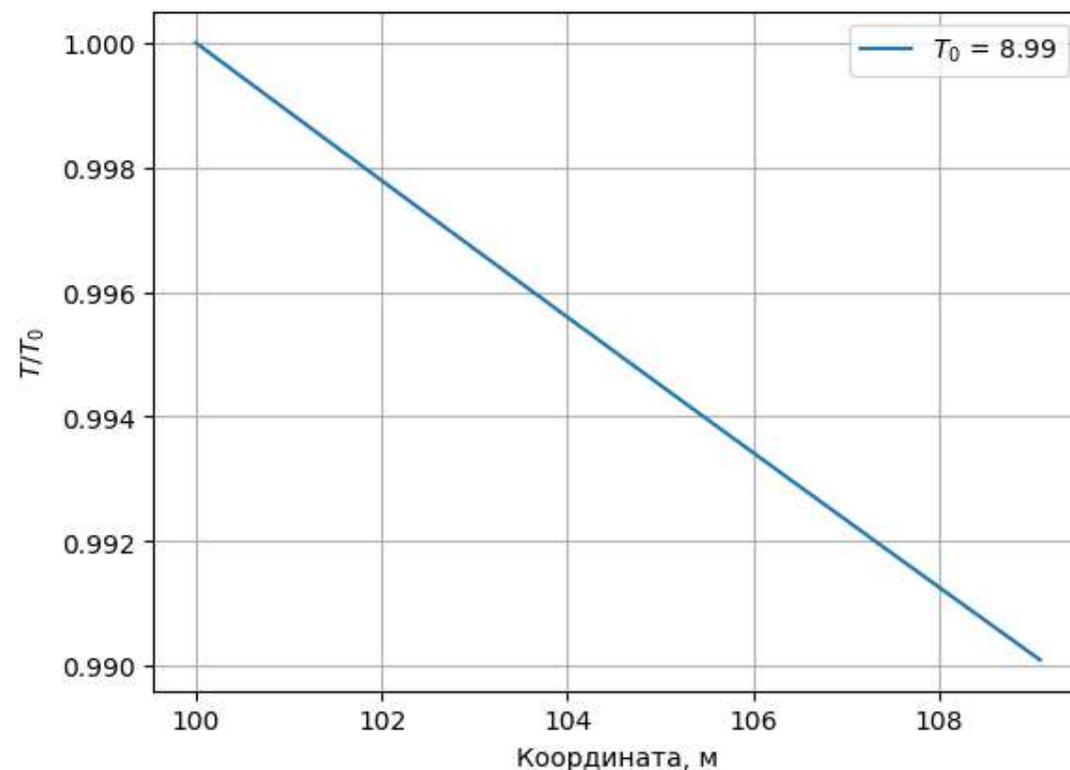
Аналитическая стационарная модель смешивания газа в интервалах притока

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{4\eta}{D} \rho_2 v_2, \\ \frac{\partial(c_V \rho T S_{\text{СКВ}})}{\partial t} = -\frac{\partial(c_V \rho S_{\text{СКВ}} T v)}{\partial x} + T_2 c_V \pi D l \eta \rho_2 v_2 \\ v(l) = \frac{Q_1 \rho_1 v_1}{Q_1 \rho_1 + S_{\text{пер}} \rho_2 v_2} \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \rho(l) v(l) - \rho_1 v_1 = \frac{4\eta}{D} \int_0^l \rho_2 v_2 dx, \\ \rho(l) T(l) v(l) - \rho_1 T_1 v_1 = \frac{1}{S_{\text{СКВ}}} \int_0^l T_2 \pi D \eta \rho_2 v_2 dx. \\ v(l) = \frac{Q_1 \rho_1 v_1}{Q_1 \rho_1 + S_{\text{пер}} \rho_2 v_2}, \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v(l) = \frac{Q_1 \rho_1 v_1}{Q_1 \rho_1 + S_{\text{пер}} \rho_2 v_2}, \\ \rho(l) = \frac{1}{v(l)} \left(\frac{4\eta}{D} \int_0^l \rho_2 v_2 dx + \rho_1 v_1 \right), \\ T(l) = \frac{1}{\rho(l) S_{\text{СКВ}} v(l)} \left(\int_0^l T_2 \pi D \eta \rho_2 v_2 dx + \rho_1 S_{\text{СКВ}} T_1 v_1 \right). \end{array} \right.$$

Аналитическая стационарная модель смешивания газа в интервалах притока. Пример

$$\left\{ \begin{array}{l} v(l) = \frac{\rho Q v_1}{\rho(Q + S_{\text{пер}} v_2)} = \frac{Q v_1}{Q + S_{\text{пер}} v_2} < v_1 \\ \rho(l) = \frac{\rho}{v(l)} \left(\frac{4\eta}{D} v_2 l + v_1 \right) \approx \frac{\rho}{v(l)} v_1 > \rho_1 \\ T(l) = \frac{\rho T}{\rho(l) v(l) S_{\text{СКВ}}} (\pi D \eta v_2 l + S_{\text{СКВ}} v_1) = \frac{\rho T}{\rho(l) v(l)} \left(\frac{4\eta}{D} v_2 l + v_1 \right) \end{array} \right.$$



$$Q_1 = Q_2 = Q = 10000 \text{ м}^3/\text{сут} = 0.1157 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$l = 10 \text{ м}$$

$$D_{\text{пер}} = 0.012 \text{ м}$$

$$v_1 = 4.174 \text{ м/с}$$

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho = 114.05 \text{ кг/м}^3$$

$$n = 10$$

$$D = 0.1 \text{ м}$$

$$v_2 = 0.5 \text{ м/с}$$

$$T_1 = T_2 = T = 282.14 \text{ К}$$

$$\eta = 0.00036$$

$$S_{\text{пер}} = 0.00113 \text{ м}^2$$

Моделирование температурного поля в системе пласт-скважина

Аналитическая модель пласта:

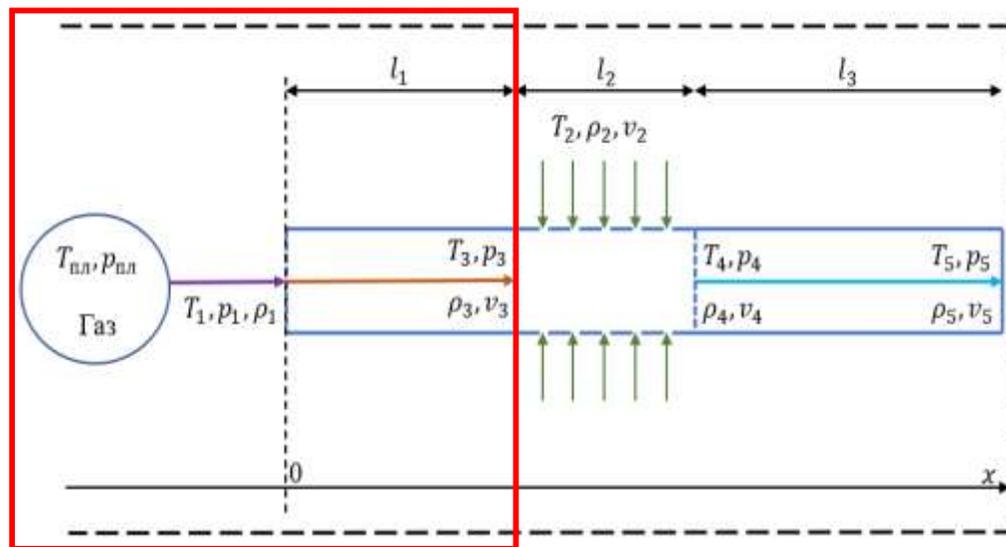
$$\begin{cases} T_1 = T_0 - \varepsilon C_1 \left[\frac{\lambda}{aC_\phi} \left(\left(\frac{R_k}{r_c} \right)^{\frac{aC_\phi}{\lambda}} - \left(\frac{r}{r_c} \right)^{\frac{aC_\phi}{\lambda}} \right) + \ln \left(\frac{r}{R_k} \right) \right] \\ p(r) = P_{\text{пл}} + \frac{P_{\text{пл}} - \phi}{\ln \left(\frac{R_k}{r_c} \right)} \ln \left(\frac{r}{R_k} \right) \end{cases}$$

$k, \mu, \varepsilon, \lambda, C_\phi, P_{\text{пл}}, T_0, R_k, r_c \rightarrow T_1, \rho_1, Q_1, p_1$

Аналитическая модель скважины:

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dz} = F_1(\rho, T) = \frac{f_2 + f_1 f_3 f_T}{1 - f_1 f_\rho - f_1 f_4 f_T} \\ \frac{dT}{dz} = F_2(\rho, T) = f_3 + \frac{f_4 (f_2 + f_1 f_3 f_T)}{1 - f_1 f_\rho - f_1 f_4 f_T} \end{cases}$$

$T_1, \rho_1, Q_1, p_1 + \text{свойства газа} \rightarrow T_3, \rho_3, v_3, p_3$



Моделирование температурного поля в системе пласт-скважина

Аналитическая модель смешивания:

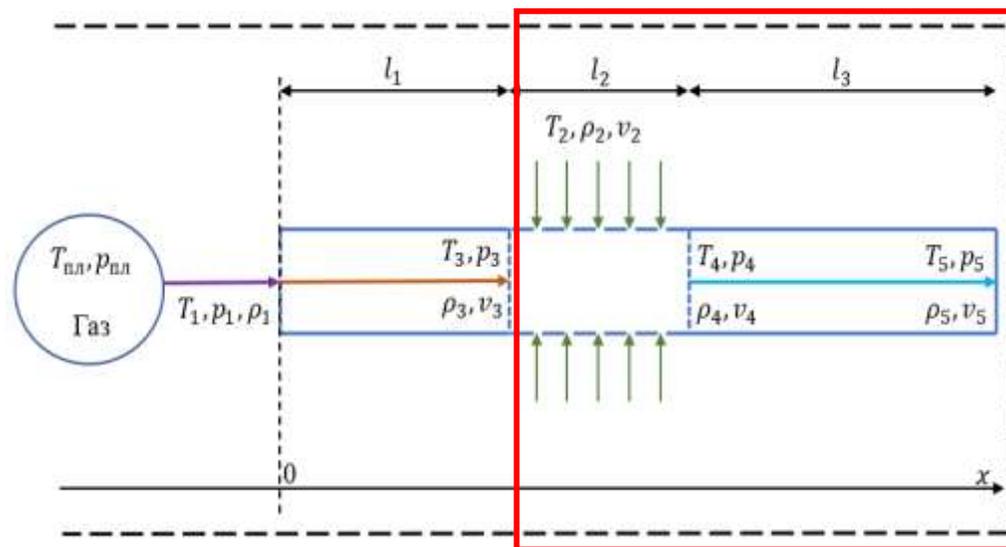
$$\left\{ \begin{array}{l} v(l) = \frac{Q_1 \rho_1 v_1}{Q_1 \rho_1 + S_{\text{пер}} \rho_2 v_2} \\ \rho(l) = \frac{1}{v(l)} \left(\frac{4\eta}{D} \int_0^l \rho_2 v_2 dx + \rho_1 v_1 \right) \\ T(l) = \frac{1}{\rho(l) S_{\text{СКВ}} v(l)} \left(\int_0^l T_2 \pi D \eta \rho_2 v_2 dx + \rho_1 S_{\text{СКВ}} T_1 v_1 \right) \end{array} \right.$$

$v_1, v_2, \rho_1, \rho_2, T_1, T_2 \rightarrow \rho_4, T_4, p_4, v_4$

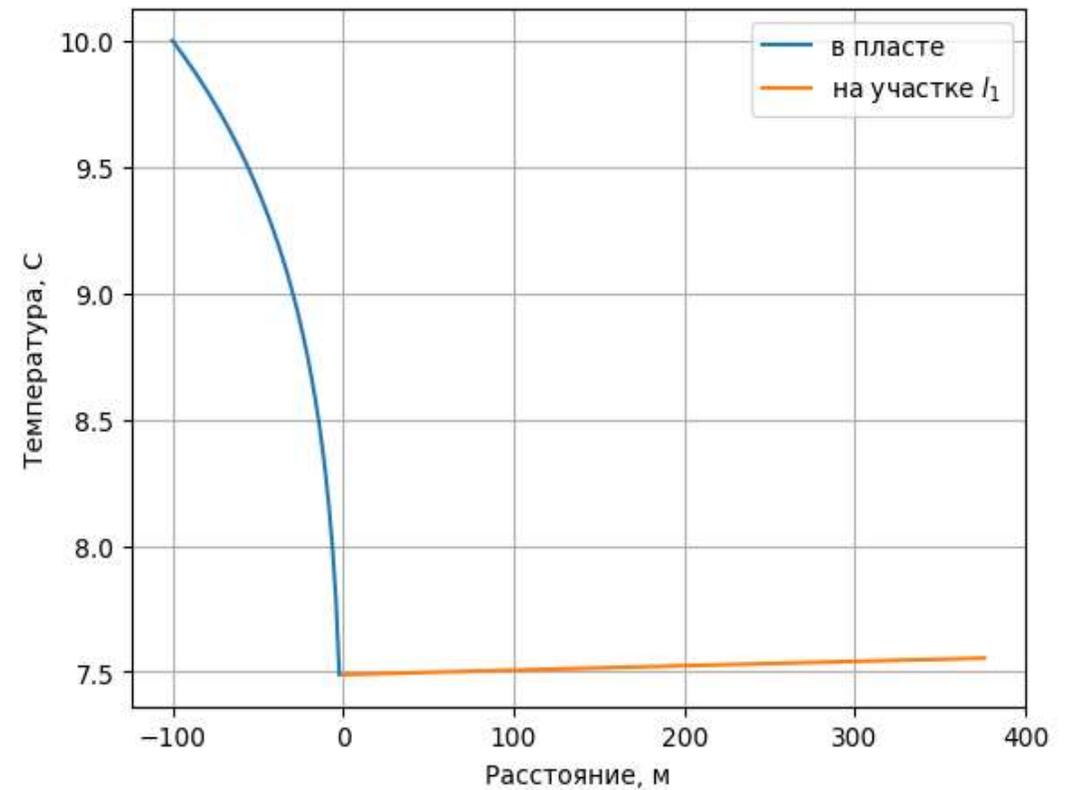
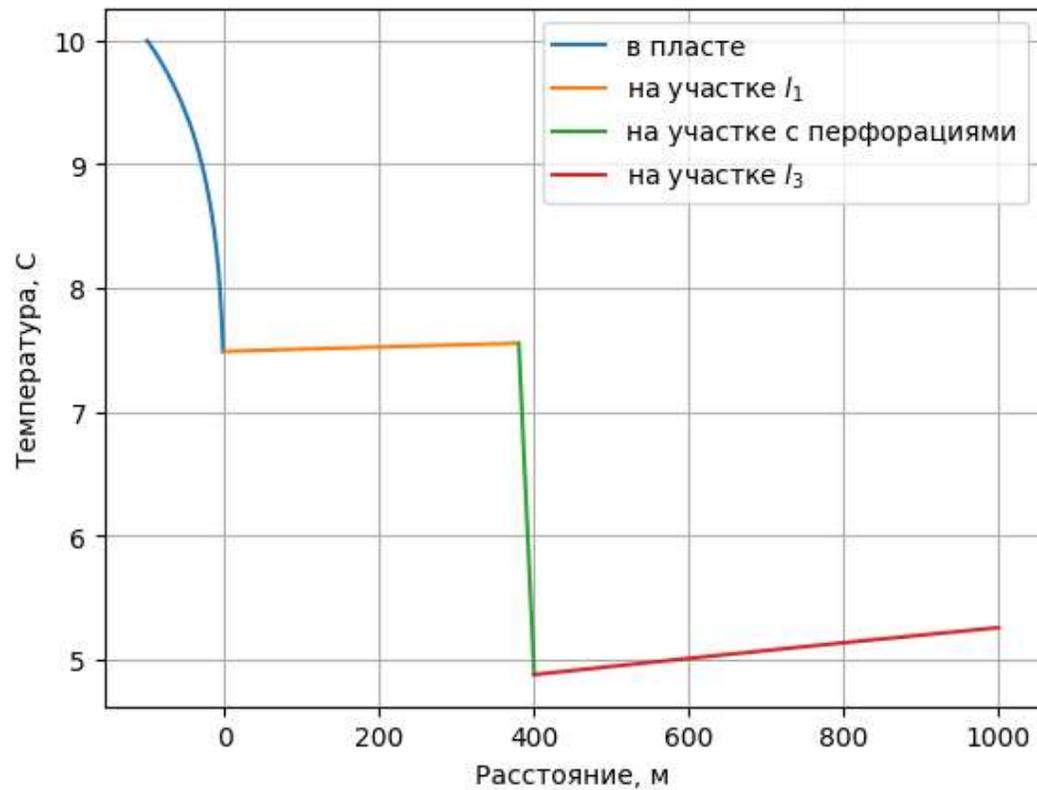
Аналитическая модель скважины:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\rho}{dz} = F_1(\rho, T) = \frac{f_2 + f_1 f_3 f_T}{1 - f_1 f_\rho - f_1 f_4 f_T} \\ \frac{dT}{dz} = F_2(\rho, T) = f_3 + \frac{f_4 (f_2 + f_1 f_3 f_T)}{1 - f_1 f_\rho - f_1 f_4 f_T} \end{array} \right.$$

$\rho_4, T_4, p_4, v_4 + \text{свойства газа} \rightarrow T_5, \rho_5, v_5, p_5$



Моделирование температурного поля в системе пласт-скважина. Пример



Результаты

1. Разработана аналитическая модель для описания изменения термобарических условий в пласте. В результате температура газа уменьшается из-за проявления эффекта Джоуля-Томсона, а также проявления радиальной теплопроводности;
2. Создана аналитическая модель, описывающая изменение давления и температуры в скважине без перфораций. В результате температура газа в скважине может как увеличиваться, так и уменьшаться, в зависимости от температуры пласта вокруг скважины, а также от значения коэффициента теплопередачи, гидравлического сопротивления и т.д.
3. Разработана модель изменения температуры на перфорированном участке скважины. Изменение температуры прямо пропорционально уменьшению скорости и обратно пропорционально увеличению плотности. Поэтому для оценки изменения температуры необходимо сравнить изменение плотности и скорости.
4. Реализована программа на языке программирования Python для математического моделирования температурного поля в системе пласт-скважина. Рассмотрена общая модельная задача, которая комбинирует соответствующие подзадачи, сопоставляя результаты одной как граничное условие следующей.