Министерство образования и науки РФ

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)

«Математическое моделирование движения влажного газа в стволе вертикальной скважины »

Работа завершена:

«__»_____2014г. _____(А.М. Сатрутдинова)

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

Список обозначений……...……..…...3

Введение……..……..…...5

Математическая модель течения влажного газа в трубе…….....…...6

Постановка задачи…….……..……..10

Численное решение……..….……13

Вычислительный алгоритм……..…….15

Результаты расчетов……..….…...16

Выводы……..……..…24

Список литературы…….……...25

Приложение……....27

Список обозначений

υ – среднее по сечению трубы скорость $\left[\frac{м}{с}\right]$;

ρ – среднее по сечению трубы плотность $\left[\frac{кг}{м^3}\right]$;

P – среднее по сечению трубы давление [ат];

T – среднее по сечению трубы температура [К];

θ – среднее по сечению трубы концентрация;

i – среднее по сечению трубы энтальпия [кДж];

R – газовая постоянная $\left[\frac{Дж}{кг \cdot К}\right]$;

z – коэффициент сверсжимаемости;

g –ускорение свободного падения $\left[\frac{м}{с^2}\right]$;

G – коэффициент геотермического градиента $\left[\frac{К}{м}\right]$;

λ – коэффициент теплопроводности $\left[\frac{Вт}{м \cdot К}\right]$;

D – диаметр трубы [м];

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

η – коэффициент адиабатического расширения $\left[\frac{К}{ат}\right]$;

α – коэффициент теплопередачи $\left[\frac{К}{Вт}\right]$;

α_f – коэффициент теплопередачи от потока газа к стенке трубы $\left[\frac{К}{Вт}\right]$;

λ_f – коэффициент теплопроводности газа $\left[\frac{Вт}{м \cdot К}\right]$;

λ_{wb} – коэффициент теплопроводности ствола скважины $\left[\frac{Вт}{м \cdot К}\right]$;

$\lambda_{гор.пор}$ - коэффициент теплопроводности горных пород $\left[\frac{Вт}{м \cdot К}\right]$;

r_w – радиус ствола скважины [м];

r_w^f – наружный радиус скважины [м];

Nu – число Нуссельта;

Re – число Рейнольдса;

Pr – число Прандтля;

$R(t)$ – радиус распространения тепла в окружающей среде [м];

a – температуропроводность $\left[\frac{м^2}{с}\right]$;

ψ – коэффициент гидравлического сопротивления;

$\Delta_э$ – относительная шероховатость [м];

ω – площадь поперечного сечения трубы [$м^2$];

C_p – удельная теплоемкость газа $\left[\frac{Дж}{кг \cdot К}\right]$;

k – средняя высота выступов шероховатости на стенках трубы;

φ – угол между осью трубы и горизонтальной плоскостью;

T_H – температура окружающей среды [К];

q – удельный тепловой поток $\left[\frac{К^2}{Вт}\right]$,;

u – внутренняя энергия [кДж];

y – ордината оси трубы[м];

x – координата, отсчитываемая вдоль оси трубы [м];

M – массовый расход $\left[\frac{кг}{с}\right]$;

μ – динамическая вязкость [$мПа \cdot с$];

t – время [сут];

τ_0 – касательное напряжение [Па];

T_f – температура фазового перехода [К].

Введение

Влажность газа является одним из основных параметров при добыче, транспортировке и переработке природного газа. Измерение этого параметра требуется на всех этапах - от скважины до газоперерабатывающего завода, и существенно влияет на экономичность и эффективность процессов.

Одной из проблем, связанных с транспортировкой влажного углеводородного газа, является образование газовых гидратов. Газовые гидраты – это кристаллические соединения, образовавшиеся в результате внедрения молекул газа в пустоты кристаллических структур, составленных из молекул воды [9]. Кристаллы газовых гидратов по виду напоминают лед или спрессованный снег, но при этом их структура отличается от кристаллической структуры льда. В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных исследованиям газовых гидратов [6,7]. Наличие влаги в газе и снижение температуры при его движении в скважинах, системах сбора и подготовки создают условия для отложения гидратов на стенках труб и оборудования, таким образом, они создают значительные проблемы с точки зрения эксплуатации и безопасности в трубопроводах.

В нефтегазодобывающей промышленности для предотвращения образования газовых гидратов реализуются технологические процессы в условиях, в которых гидраты нестабильны. Необходимо определить условия, способствующие образованию гидратов при течении природного газа и, соответственно, не допускать их возникновения.

В этой работе численно моделируется процесс течения влажного газа в вертикальной газовой скважине. Исследуется условия образования газовых гидратов при различных режимах работы газовой скважины.

Математическая модель течения влажного газа в трубе

Основные дифференциальные уравнения, описывающие движение газа в трубе, выводятся из законов сохранения массы, импульса и энергии. Движение влажного газа в трубе считается одномерным, т.е. все определяющие параметры зависят от одной пространственной координаты x, отсчитываемой вдоль оси трубы.

Уравнения, описывающие течение газа в трубе имеют следующий вид [1,5]

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\upsilon\omega)}{\partial x}=0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\upsilon\omega)+\frac{\partial}{\partial x}[(p+\rho\upsilon^2)\omega]=p\frac{d\omega}{dx}-\rho g\omega\frac{dy}{dx}-\pi D\tau_0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\omega\left(u+\frac{\upsilon^2}{2}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[\rho\upsilon\omega\left(u+\frac{p}{\rho}+\frac{\upsilon^2}{2}\right)\right]=-\rho g\upsilon\omega\frac{dy}{dx}+\pi Dq, \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega\theta)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho\upsilon\omega\theta)=0. \tag{4}$$

Особое место в (2) занимает последнее слагаемое, характеризующее силы трения на стенке трубы. Касательное напряжение на стенке τ_0 в соответствии с гидравлической формулой Дарси – Фейсбаха может быть представлено в виде [2]

$$\tau_0=\varphi\left(\mathrm{Re},\frac{k}{D}\right)\rho\upsilon|\upsilon|=\frac{\psi}{8}\rho\upsilon|\upsilon|, \tag{5}$$

где k - средняя высота выступов шероховатости на стенках трубы, $\psi=8\varphi\left(\mathrm{Re},\frac{k}{D}\right)$ - так называемый коэффициент гидравлического сопротивления, в общем случае зависит от числа Рейнольдса, диаметра и относительной шероховатости стенок трубы [3].

С учетом (5) уравнение (2) запишется в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\upsilon\omega)+\frac{\partial}{\partial x}[(p+\rho\upsilon^2)\omega]=p\frac{d\omega}{dx}-\rho g\omega\frac{dy}{dx}-\frac{\pi}{8}D\psi\rho\upsilon|\upsilon|. \tag{6}$$

Вывод окончательных уравнений, описывающих движение влажного газа, приводится без распределительных стоков и источников массы. Уравнение неразрывности (1) в случае стационарного течения имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \upsilon \omega) = 0 \text{ или } \rho \upsilon \omega = M = const, \tag{7}$$

Уравнение движения (2) в стационарном случае имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}[(p + \rho \upsilon^2)\omega] = p\frac{d\omega}{dx} - \rho g \omega \frac{dy}{dx} - \frac{\pi}{8} D \psi \rho \upsilon |\upsilon|. \tag{8}$$

Учет инерционных членов в (3) и (8) оправдывает себя только при пусковых и аварийных режимах, а также в случае работы скважин с очень большими дебитами. Действительно, преобразуя выражение

$$p + \rho \upsilon^2 = p\left(1 + \frac{\rho}{p}\upsilon^2\right) = p\left(1 + \frac{\upsilon^2}{a^2}\right), \tag{9}$$

где a - скорость звука, замечено, что если скорость течения газа далека от скорости звука, то вторым слагаемым в скобке можно пренебречь.

С учетом (9) уравнение (8) примет вид

$$\omega \frac{dp}{dx} = -\rho g \omega \frac{dy}{dx} - \frac{\pi}{8} D \psi \rho \upsilon |\upsilon|. \tag{10}$$

$y(x)$ есть ордината оси трубы, отсчитываемая от горизонтальной плоскости. Считая ось трубы прямолинейной, можно записать $y = x\, Sin\varphi$. Здесь x – координата, отсчитываемая вдоль оси трубы; φ – угол между осью трубы и горизонтальной плоскостью (для горизонтального газопровода $\varphi = 0^{\circ}$, для вертикальной скважины $\varphi = 90^{\circ}$).

С учетом (7) и $D = 2\sqrt{\frac{\omega}{\pi}}$, последнее слагаемое в (10) имеет вид:

$$-\frac{\pi}{8} D \psi \rho \upsilon |\upsilon| = -\frac{\sqrt{\pi}\psi M^2}{4\rho \omega^{1.5}}, \tag{11}$$

В итоге уравнение сохранения импульса (10) запишется в виде:

$$\frac{dp}{dx} = -\rho g Sin\varphi - \frac{\sqrt{\pi}\psi M^2}{4\rho \omega^{2.5}}\ . \tag{12}$$

В уравнении (3) член, содержащий удельный тепловой поток, характеризует теплообмен движущихся в трубе жидкости или газа с окружающей средой. Обычно считают, что этот теплообмен происходит по закону Ньютона [4]

$$q = \alpha(T_H - T), \tag{13}$$

где T_H -температура окружающей среды; T -температура движущейся в трубе среды; α - суммарный коэффициент теплопередачи.

Вместо внутренней энергии u используется другая термодинамическая величина - энтальпия $i = u + \frac{p}{\rho}$ и с учетом (9) уравнение (3) запишется в виде

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\left[i - \frac{p}{\rho}\right]\omega\right) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\upsilon\omega i) = -\rho g\frac{dy}{dx}\upsilon\omega + \pi Dq, \tag{14}$$

После преобразований уравнение (14) имеет вид

$$\rho\omega\left(\frac{\partial i}{\partial t} + \upsilon\frac{\partial i}{\partial x}\right) + i\left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\upsilon\omega)\right] - \frac{\partial}{\partial t}(p\omega) = -\rho g\frac{dy}{dx}\upsilon\omega + \pi Dq. \tag{15}$$

Записывается выражение для дифференциала энтальпии

$$di = C_p dT + \left[V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p\right]dp, \tag{16}$$

где $C_p(p, T)$ – удельная теплоемкость газа.

Подставляя (16) в (15) получается следующее уравнение:

$$\rho\omega\left(C_p\frac{\partial T}{\partial t} + \left[V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p\right]\frac{\partial p}{\partial t} + \upsilon C_p\frac{\partial T}{\partial x} + \upsilon\left[V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p\right]\frac{\partial p}{\partial x}\right) - \omega\frac{\partial p}{\partial t} -$$

$$-p\frac{\partial\omega}{\partial t} = -\rho g\frac{dy}{dx}\upsilon\omega + \pi Dq, \tag{17}$$

Окончательный вид уравнения сохранения энергии имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{M}{\rho\omega}\left(\frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{g}{C_p}Sin\varphi\right) - \eta\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p}{\rho\omega C_p}\frac{\partial\omega}{\partial t} + \frac{4\alpha(T_H - T)}{\rho D C_p}, \tag{18}$$

где $\eta = \frac{T}{C_p}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$- коэффициент адиабатического расширения, $\varepsilon = \frac{1}{C_p}\left[V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p\right]$ – коэффициент Джоуля-Томсона.

Уравнение (4) записывается в виде:

$$\omega \frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} + M \frac{\partial(\rho\theta)}{\partial x} = 0. \tag{19}$$

Связь давления и температуры определяется уравнением состояния смеси

$$P = \rho R T z. \tag{20}$$

Постановка задачи

Движение влажного газа в стволе вертикальной скважины считается одномерным, при этом площадь сечения трубы $\omega -$ постоянная величина. В этом случае процесс тепломассопереноса в стволе газовой скважины описывается системой уравнений:

$$\frac{dp}{dx} = -\rho g - \frac{\sqrt{\pi}\psi M^2}{4\rho\omega^{2.5}}, \qquad 0 \le x \le l, \tag{1}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{M}{\rho\omega}\left(\frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{g}{C_p}\right) - \eta\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{4\alpha(T_H - T)}{\rho D C_p}, \quad 0 \le x \le l, \ 0 \le t \le T, \tag{2}$$

$$\omega\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} + M\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial x} = 0, \qquad 0 \le x \le l, \qquad 0 \le t \le T, \tag{3}$$

$$P = \rho R T z, \tag{4}$$

с начальными

$$T(x,0) = T_0 - xG, \tag{5}$$

$$\theta(x,0) = \theta_0, \tag{6}$$

и граничными условиями

$$T(0,t) = T_0, \tag{7}$$

$$P(0,t) = P_0, \tag{8}$$

$$\theta(0,t) = \theta_0. \tag{9}$$

где T_0, θ_0, P_0- температура, концентрация, давление на забое скважины, $z -$ коэффициент сверхсжимаемости, $\rho -$ плотность среды, $g -$ ускорение свободного падения, $\psi -$ коэффициент гидравлического сопротивления, ε - коэффициент Джоуля – Томсона, $\eta -$ коэффициент адиабатического расширения, T — температура, p – давление, ω – площадь поперечного сечения трубы $C_p -$ удельная теплоёмкость газа, α – коэффициент теплопередачи, $D -$ диаметр скважины, $T_H -$ температура окружающей среды, $R -$ газовая постоянная, G – коэффициент геотермического градиента, $\mu -$ динамическая вязкость.

Коэффициент сверхсжимаемости газа вычисляется по формуле Платонова-Гуревича [8]:

$$z(p,T) = (0{,}17376 \ln\left(\frac{T}{T_c}\right) + 0{,}73)^{\frac{P}{P_c}} + 0{,}1\frac{P}{P_c},$$

где $T_c = 190.5\ K,\ P_c = 4.58$ МПа.

Коэффициент теплопередачи между потоком газа и окружающей средой вычисляется по формуле:

$$\alpha = \left[\frac{1}{\alpha_f} + \frac{r_w}{\lambda_{wb}}\ ln\frac{r_w^f}{r_w} + \frac{r_w^f}{\lambda_{\text{гор.пор}}}\ ln\frac{R(t)}{r_w^f}\right]^{-1},$$

где α_f – коэффициент теплопередачи от потока газа к стенке трубы, λ_{wb} – коэффициент теплопроводности ствола скважины, $\lambda_{\text{гор.пор}}$ – коэффициент теплопроводности горных пород, r_w – радиус ствола скважины, r_w^f – наружный радиус скважины.

Коэффициент теплопередачи из потока газа к стенке трубопровода вычисляется по формуле:

$$\alpha_f = \frac{Nu}{\lambda_f 2 r_w},$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности газа.

$Nu = 0{,}021\ Re^{0{,}8} Pr^{0{,}43}$ – число Нуссельта.

$Re = \frac{4M}{\pi\mu D}$ – число Рейнольдса,

$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$ – число Прандтля,

$R(t) = \sqrt{ta}$ – радиус распространения тепла в окружающей среде, где a – температуропроводность.

Коэффициент гидравлического сопротивления вычисляется по формуле Альтшуля:

$$\psi = 0{,}11\left(\frac{\Delta_э}{D} + \frac{68}{Re}\right)^{0{,}25},$$

где $\Delta_э$ – относительная шероховатость.

Равновесная температура образования гидрата вычисляется по формуле:

$$T_f(p) = a\ Lnp + b,$$

где $a = 10.036$ К, $b = 125.023$ К.

Численное решение

Задача (1) – (9) решается методом конечных разностей. В области решения $\Omega = \{0 \le x < l,\ 0 < t \le T\}$ вводится разностная сетка узлов $\overline{\omega}_h = \left\{h,\ h = \frac{L}{N},\ x_i = ih,\ i = \overline{0,N}\right\}, \overline{\omega}_\tau = \{t_n,\ 0 = t_0 < t_1 < \cdots < t_M = T,\ t_n - t_{n-1} = \tau\}$ и полагается $P_i = P(x_i), T_i^n = T(x_i, t_n), \theta_i^n = \theta(x_i, t_n)$.

В результате аппроксимации системы (1) – (9) получается следующая конечно – разностная схема:

$$\frac{p_i - p_{i-1}}{h} = -\rho_i g - \frac{\sqrt{\pi}\psi M^2}{4\rho_i \omega^{2.5}}, \qquad i = \overline{2,N}$$

$$\frac{T_i^n - T_i^{n-1}}{\tau} + \frac{M}{\rho_i \omega}\left[\frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{h} + \varepsilon\frac{p_i - p_{i-1}}{h} + \frac{g}{C_p}\right] - \eta\frac{p_i^n - p_i^{n-1}}{\tau} =$$

$$= \frac{4\alpha_i^n}{C_p D \rho_i}(T_{Hi} - T_i^n), \qquad i = \overline{2,N}, \qquad n = \overline{1,M},$$

$$\omega\left(\frac{\rho_i^n - \rho_i^{n-1}}{\tau}\theta_i^n + \frac{\theta_i^n - \theta_i^{n-1}}{\tau}\rho_i^n\right) + M\frac{\theta_i^n - \theta_{i-1}^n}{h} = 0,\ \ i = \overline{2,N},\ \ n = \overline{1,M},$$

$$\rho_i = \frac{p_i}{RT_i^n z_i}, \qquad i = \overline{1,N}, \qquad n = \overline{1,M},$$

$$T_i^0 = T_0 - x_i G, \qquad i = \overline{1,N},$$

$$\theta_i^0 = \theta_0, \qquad i = \overline{1,N},$$

$$T_1^n = T_0, \qquad n = \overline{1,M},$$

$$\theta_1^n = \theta_0, \qquad n = \overline{1,M},$$

$$P_1 = P_0, \qquad n = \overline{1,M},$$

$$z_i = \left(0{,}17376\ln\left(\frac{T_i^n}{T_c}\right) + 0{,}73\right)^{p_i/p_c} + 0{,}1\frac{p_i}{p_c}, \qquad i = \overline{1,N}, \qquad n = \overline{1,M}$$

$$\alpha^n = \left[\frac{1}{\alpha_f} + \frac{r_w}{\lambda_{wb}}\ ln\frac{r_w^f}{r_w} + \frac{r_w^f}{\lambda_{\text{гор.пор}}}\ ln\frac{R^n}{r_w^f}\right]^{-1},$$

$$\alpha_f = \frac{Nu}{\lambda_f 2r_w}, \qquad Nu = 0{,}021\ Re^{0{,}8}Pr^{0{,}43},$$

$$Re = \frac{4M}{\pi\mu D}, \qquad Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda},$$

$$R^n = \sqrt{t_n a}, \qquad \psi = 0{,}11\left(\frac{\Delta_э}{D} + \frac{68}{Re}\right)^{0.25}.$$

Вычислительный алгоритм.

$$\begin{cases} p_i = p_{i-1} - h\left(\rho_i g + \dfrac{\sqrt{\pi}\psi M^2}{4\rho_i \omega^{2.5}}\right), \qquad i = \overline{2,N}, \qquad n = \overline{1,M}, \\ T_i^n = \dfrac{\dfrac{T_i^{n-1}}{\tau} + \dfrac{M}{\rho_i \omega}\left[\dfrac{T_{i-1}^n}{h} - \varepsilon\dfrac{p_i^n - p_{i-1}^n}{h} - \dfrac{g}{C_p}\right] + \eta\dfrac{p_i^n - p_i^{n-1}}{\tau} + \dfrac{4\alpha_i^n}{C_p D \rho_i}(T_{Hi})}{\left(\dfrac{1}{\tau} + \dfrac{M}{\rho_i \omega h} + \dfrac{4\alpha_i^n}{C_p D \rho_i}\right)}, \\ \rho_i = \dfrac{p_i}{R T_i^n z_i}, \qquad i = \overline{1,N}, \ \ n = \overline{1,M}, \\ \theta_i^n = \dfrac{\omega\rho_i^n\left(\dfrac{\theta_i^{n-1}}{\tau}\right) + M\left(\dfrac{\theta_{i-1}^n}{h}\right)}{\omega\left(\dfrac{2\rho_i^n - \rho_i^{n-1}}{\tau}\right) + \dfrac{M}{h}}, \qquad i = \overline{2,N}, \ \ n = \overline{1,M}. \end{cases}$$

На каждом временном слое система решается методом простых итераций.

На основе вычислительного алгоритма создан программный комплекс в среде Delphi.

Листинг программы представлен в приложении.

Результаты расчетов

Исследуется условия образования газовых гидратов при различных режимах работы газовой скважины.

Для первого варианта расчеты выполнялись при следующих значениях основным параметров : $r_w = 0{,}1$[м], $r_w^f = 0{,}11$[м], $\lambda_{wb} = 50\left[\frac{Вт}{м \cdot К}\right]$, $\lambda_f = 0{,}0072\left[\frac{Вт}{м \cdot К}\right]$, $\lambda_{гор.пор} = 1{,}163\left[\frac{Вт}{м \cdot К}\right]$, $a = 0{,}0012641\left[\frac{м^2}{с}\right]$, $M = 5\left[\frac{кг}{с}\right]$, ω=0,015[м^2], $l = 1000$ [м], $R = 520\left[\frac{Дж}{кг \cdot К}\right]$, $C_р = 2093\left[\frac{Дж}{кг \cdot К}\right]$, $\Delta_э = 2 \cdot 10^{-4}$[м], $T_с = 190{,}5$ [К], $P_с = 45{,}8$ [ат], $t = 5$ сут, $G = 0{,}01\left[\frac{К}{м}\right]$, $\mu = 0{,}012$ [мПа $\cdot$ с], $g = 9{,}8\left[\frac{м}{с^2}\right]$, $\varepsilon = -0{,}02\left[\frac{К}{ат}\right]$, $\eta = 0{,}014\left[\frac{К}{ат}\right]$, $T_н$= 283[К], $T_0 = 282{,}9137$[К], $P^0 = 68$ [ат], $\theta_0 = 1$.

Для второго варианта: $T_0 = 289{,}58571$[К], $P^0 = 132{,}2$ [ат], остальные параметры имеют те же значения, что и первом варианте.

Результаты расчетов для первого варианта приводятся на рисунках 1 – 6 , для второго варианта на рисунках 7 – 12.

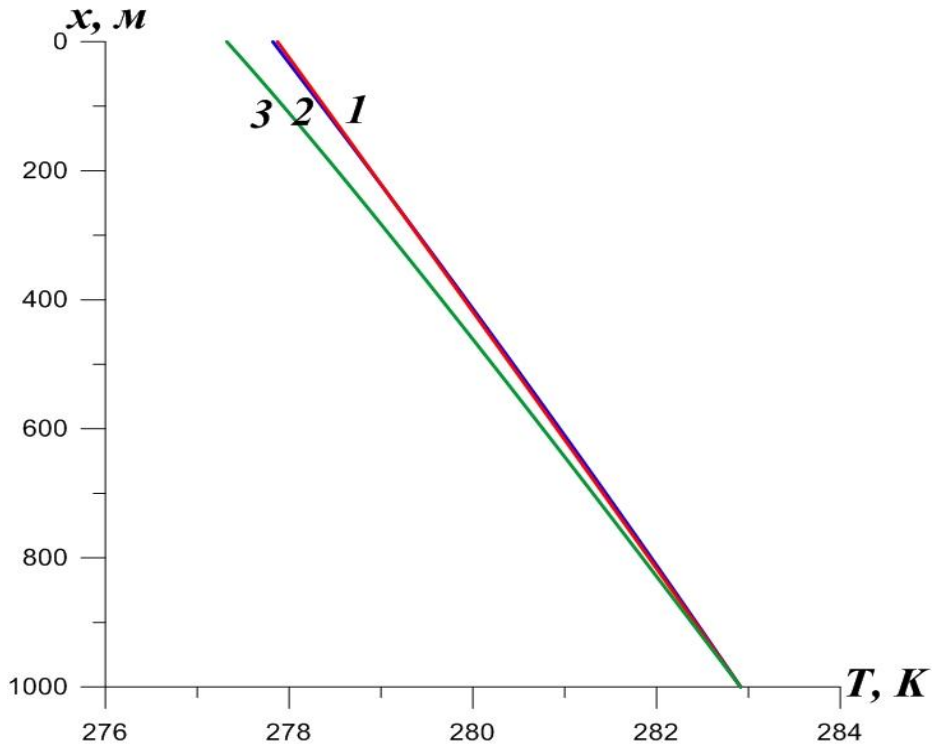

Рис.1. Вариант 1. Распределение температуры в скважине

$1 - m = 5\frac{кг}{с}$, $2 - m = 25\frac{кг}{с}$, $3 - m = 45\frac{кг}{с}$

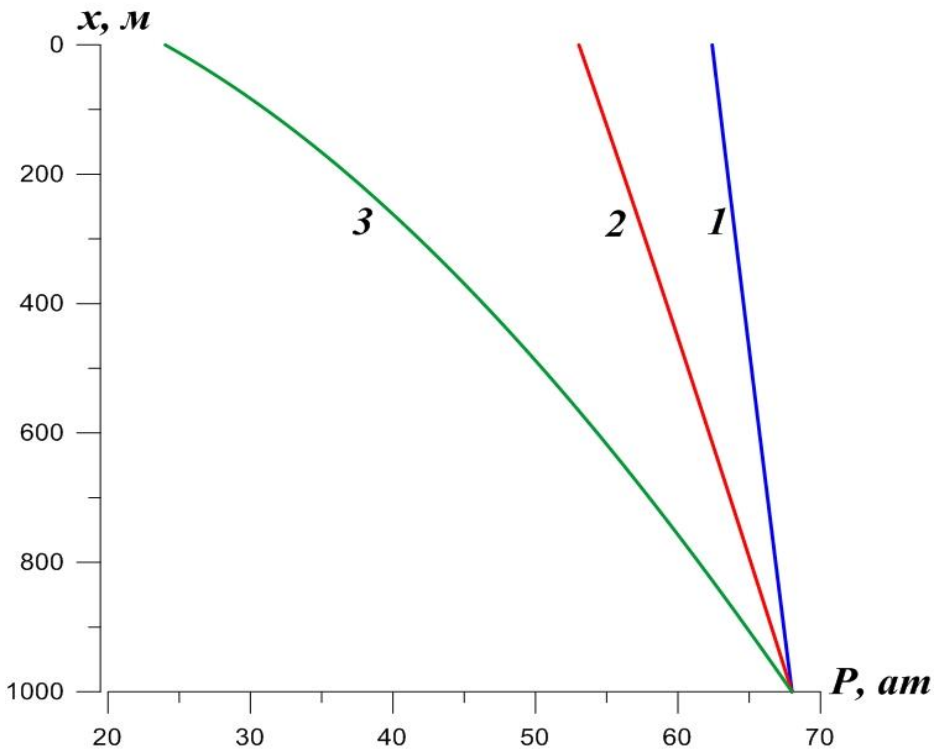

Рис.2. Вариант 1. Распределение давления в скважине
$1 - m = 5\frac{\text{кг}}{\text{с}},\ 2 - m = 25\frac{\text{кг}}{\text{с}}, 3 - m = 45\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

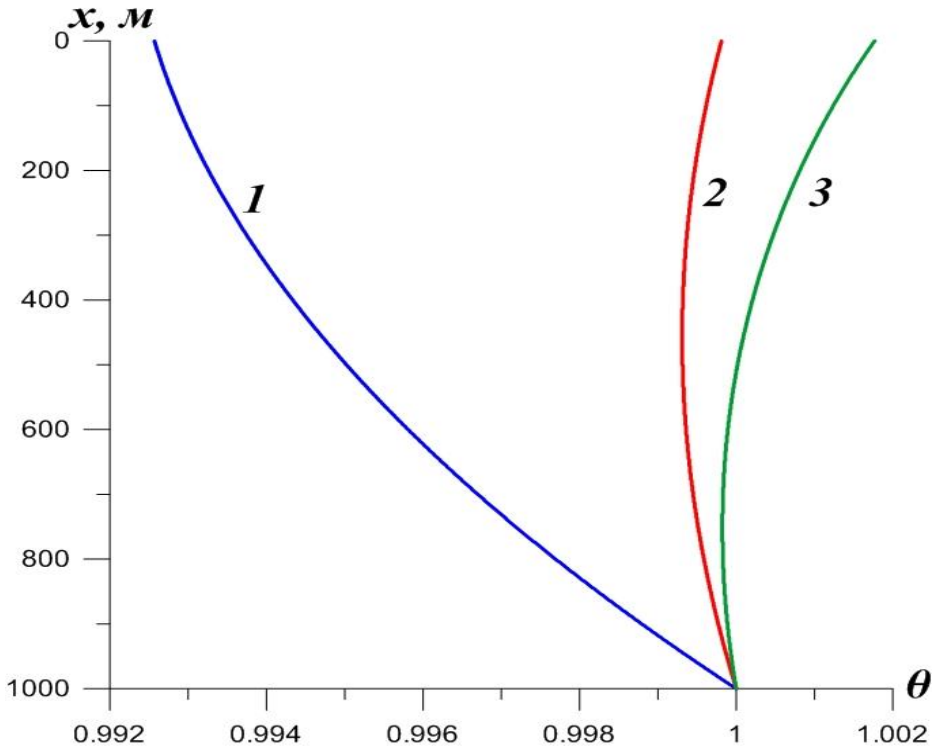

Рис.3. Вариант 1. Распределение влажности в скважине
$1 - m = 5\frac{\text{кг}}{\text{с}}, \qquad 2 - m = 25\frac{\text{кг}}{\text{с}}, 3 - m = 45\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

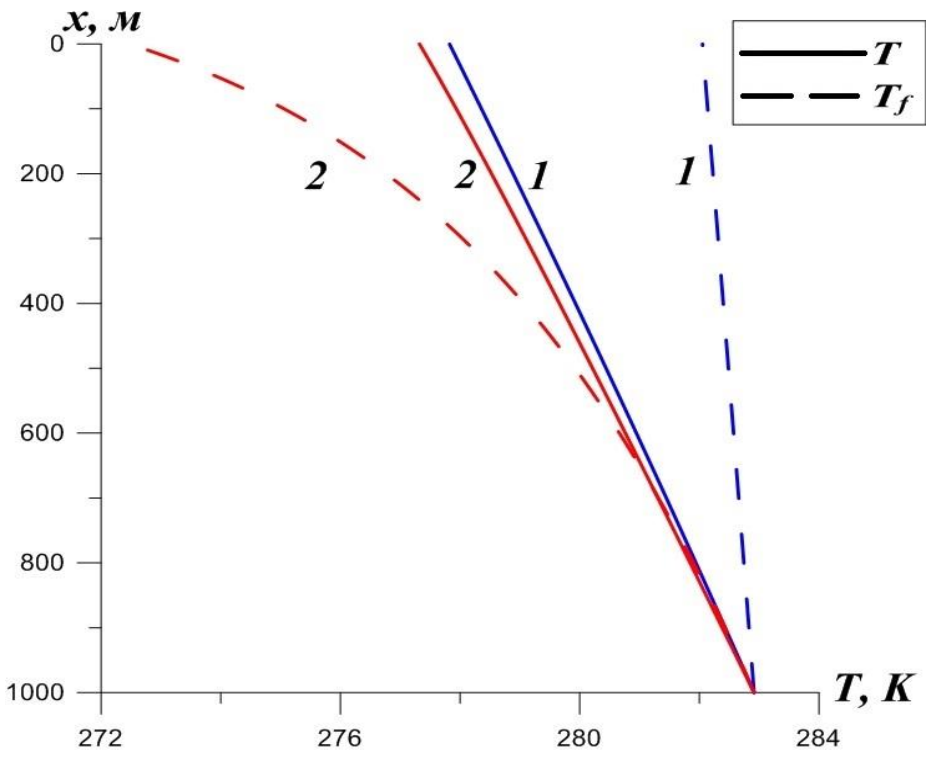

Рис.4. Вариант 1. Распределение температуры в скважине $T_0 = 282,9137$ К, $1 - m = 5\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $2 - m = 45\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

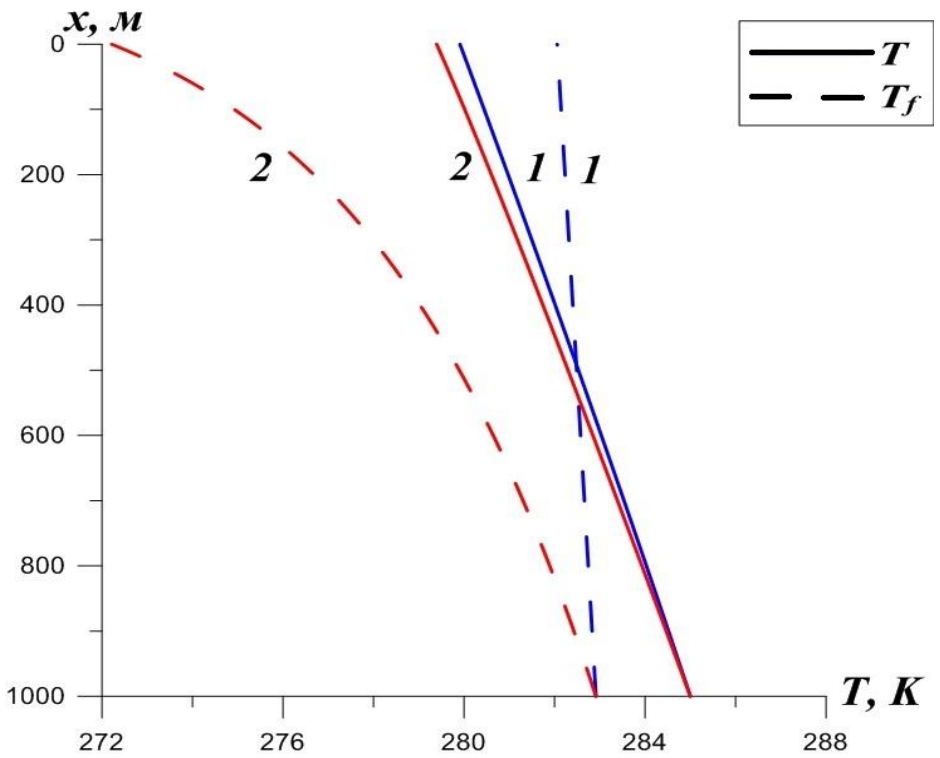

Рис.5. Вариант 1. Распределение температуры в скважине $T_0 = 285$ К, $1 - m = 5\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $2 - m = 45\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

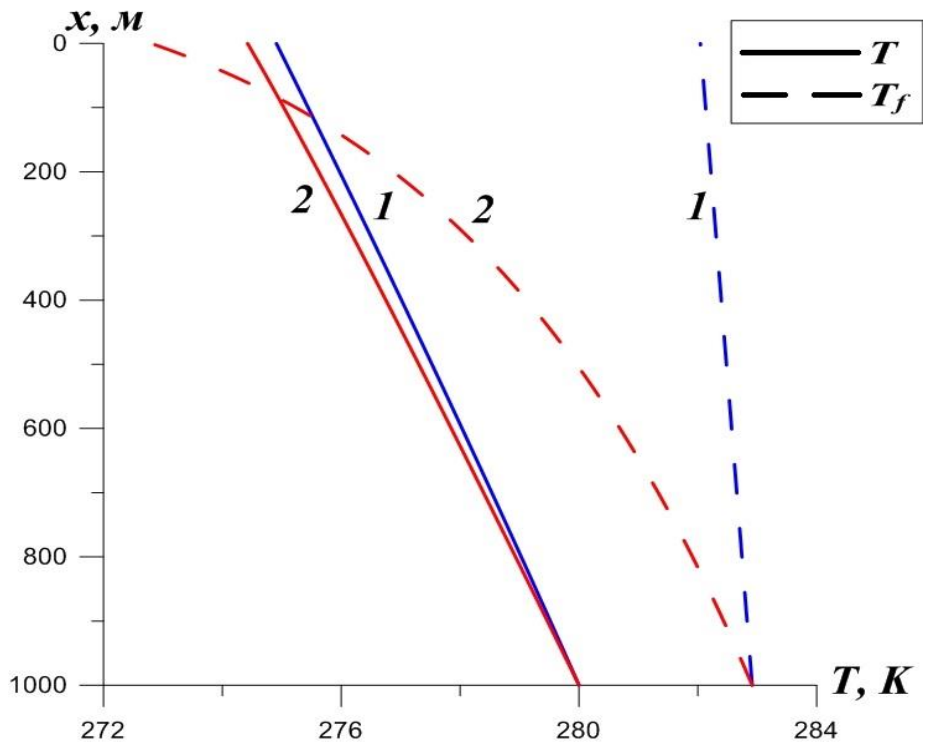

Рис.6. Вариант 1. Распределение температуры в скважине $T_0 = 280$ К, $1 - m = 5\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $2 - m = 45\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

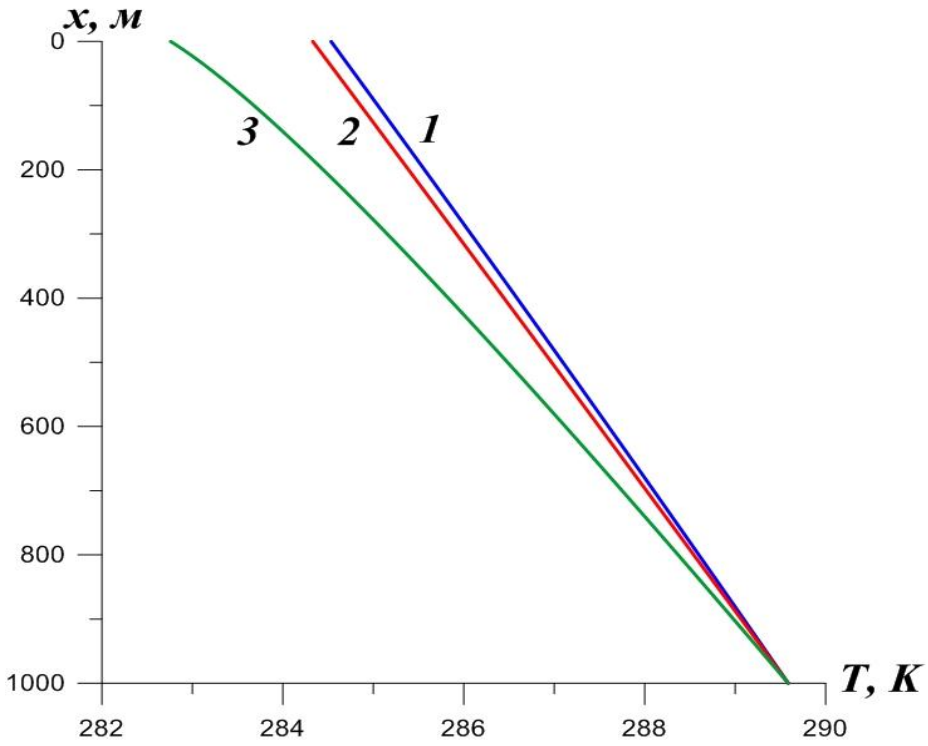

Рис.7. Вариант 2. Распределение температуры в скважине $1 - m = 10\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $2 - m = 50\frac{\text{кг}}{\text{с}}, 3 - m = 100\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

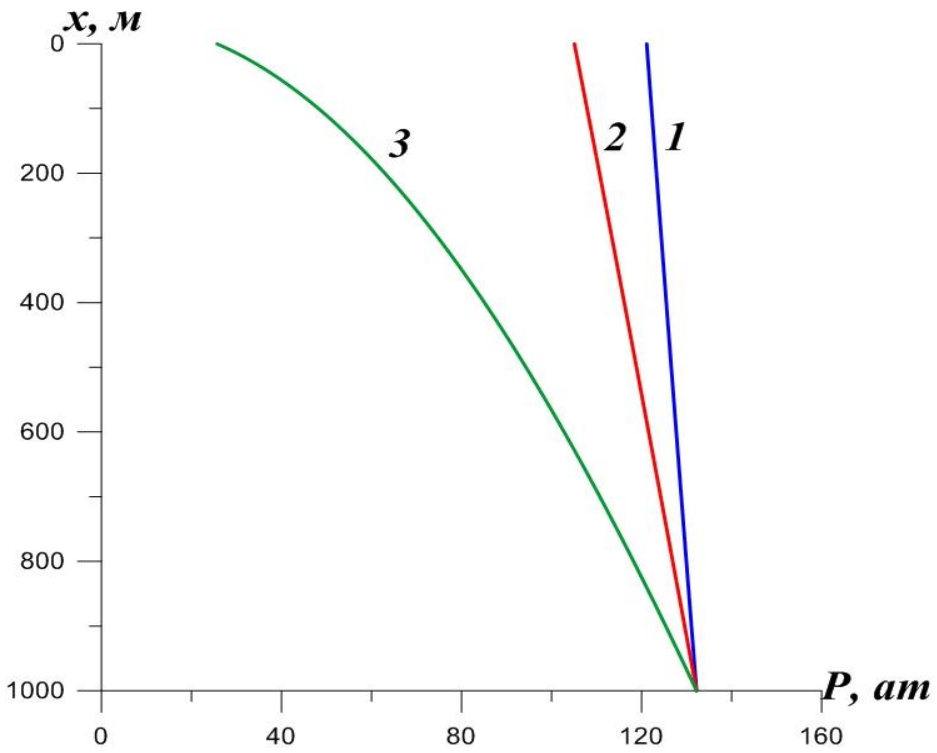

Рис.8. Вариант 2. Распределение давления в скважине
$1 - m = 10\frac{\text{кг}}{\text{с}}, \qquad 2 - m = 50\frac{\text{кг}}{\text{с}}, 3 - m = 100\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

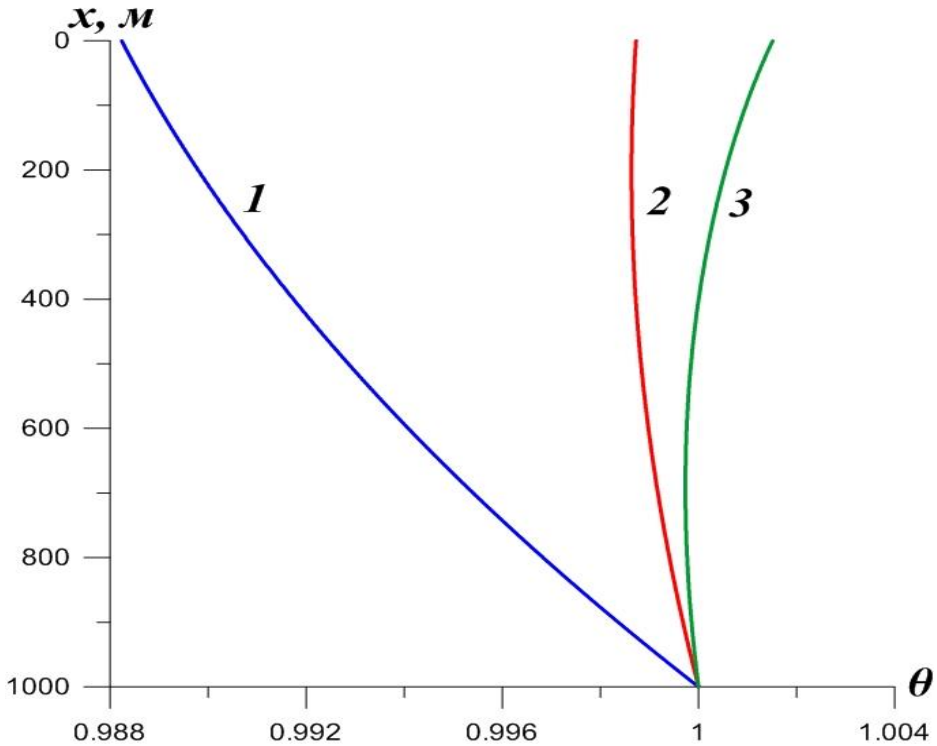

Рис.9. Вариант 2. Распределение влажности в скважине
$1 - m = 10\frac{\text{кг}}{\text{с}}, \qquad 2 - m = 50\frac{\text{кг}}{\text{с}}, 3 - m = 100\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

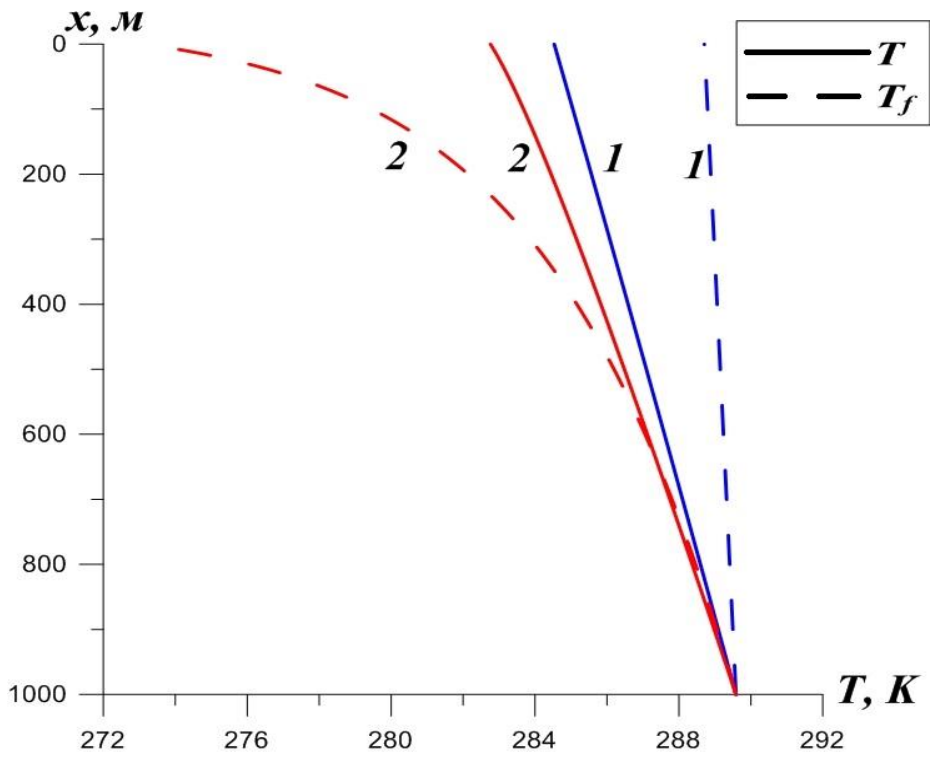

Рис.10. Вариант 2. Распределение температуры в скважине $T_0 = 289{,}58571$ К, $1 - m = 10\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $2 - m = 100\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

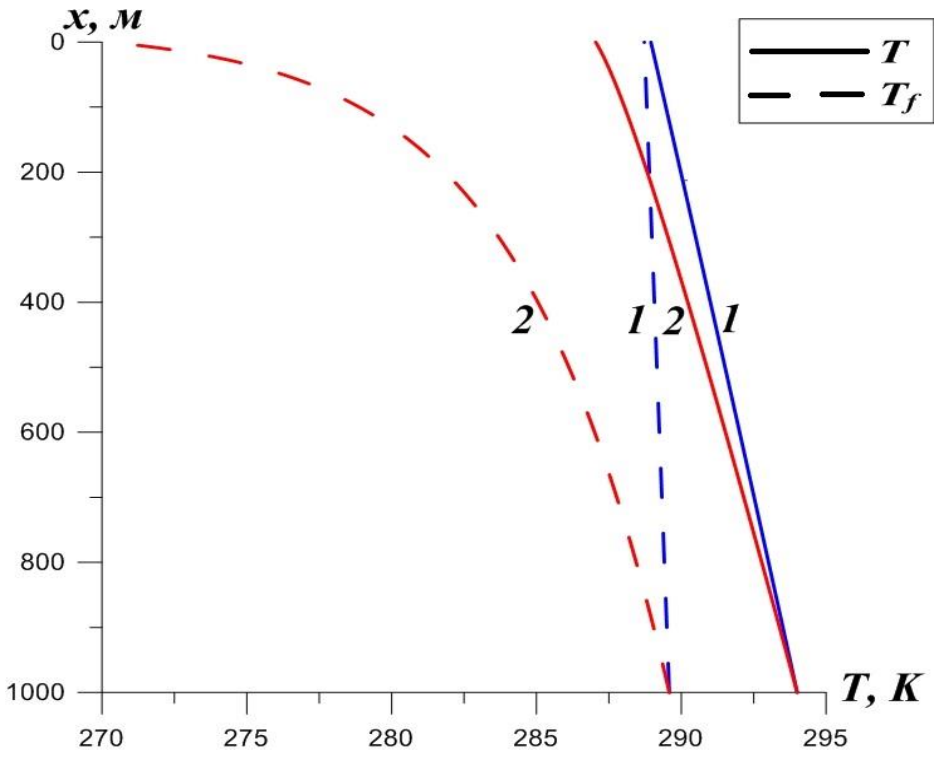

Рис.11. Вариант 2. Распределение температуры $T_0 = 294$ К, $1 - m = 10\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $2 - m = 100\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

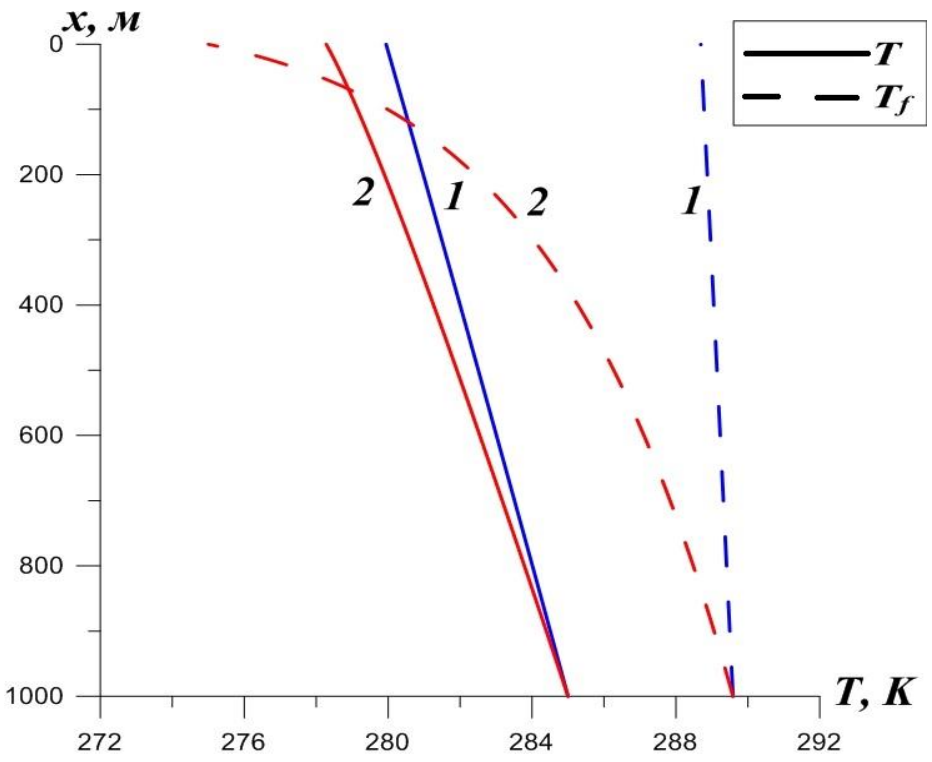

Рис.12. Вариант 2. Распределение температуры в скважине $T_0 = 285$ К, $1 - m = 10\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $2 - m = 100\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

На рис. 1–3 приведены распределения температуры, давления и влажности по длине скважины при различных значениях массового расхода для первого варианта. Из рисунков видно, что увеличение массового расхода мало влияет на изменение температуры, но существенное влияние оказывает на давление и влажность.

На рис. 4–6 приведены распределения температур по длине скважины при различных значениях массового расхода и температуры для первого варианта. Штриховая линия показывает температуру гидратообразования, соответствующую полученному распределению давления. Образование гидратов происходит на участках, где температура газа ниже температуры гидратообразования.

На рис. 4 температура газа на забое скважины является равновесной температурой. Из рисунка видно, что при малом значении массового расхода происходит образование гидратов, но при большом значении гидраты будут образовываться на забое скважины. На рис.5 температура выше равновесной.

Из рисунка видно, что увеличение температуры на забое скважины не приводит к безгидратному режиму работы скважины. При большом значении массового расхода гидраты не образуются, но при малом значении гидраты могут образоваться на устье скважины. На рис. 6 температура ниже равновесной. Из рисунка видно, что при большом и малом значении массового расхода гидраты образуются.

На рис. 7–9 приведены распределения температуры, давления и влажности по длине скважины при различных значениях массового расхода для второго варианта. Из рисунков видно, что увеличение массового расхода мало влияет на изменение температуры, но существенное влияние оказывает на давление и влажность.

На рис. 10–12 приведены распределения температур по длине скважины при различных значениях массового расхода и температуры для второго варианта. Штриховая линия показывает температуру гидратообразования, соответствующую полученному распределению давления. Образование гидратов происходит на участках, где температура газа ниже температуры гидратообразования.

На рис. 10 температура газа на забое скважины является равновесной температурой. Из рисунка видно, что при малом значении массового расхода происходит образование гидратов, но при большом значении гидраты будут образовываться на забое скважины. На рис.11 температура выше равновесной. Из рисунка видно, что увеличение массового расхода приводит к безгидратному режиму работы скважины. На рис. 12 температура ниже равновесной. Из рисунка видно, что при малом и большом значении массового расхода гидраты образуются.

Выводы

1. Численно решена задача о движении влажного газа в стволе вертикальной газовой скважины.
2. На модельных примерах исследованы условия образования газовых гидратов при различных режимах работы газовой скважины.
3. На основе численных расчетов, установлено, что при малых дебитах скважины существует большая вероятность образования гидратов. Повышение температуры на забое скважины позволит создать условия для безгидратного режима работы скважины.

Список литературы

1. Неизотермическое течение газа в трубах / О.Ф.Васильев, Э.А.Бондарев, А.Ф.Воеводин, А.М.Каниболотский.– Н.: Наука, 1978.– 127с.
2. Гинзбург, И.П. Прикладная гидродинамика / И.П.Гинзбург.– Л.: Изд-во ЛГУ, 1958.– 338с.
3. Марон, В.И. Гидродинамика однофазных и многофазных потоков в трубопроводе / В.И.Марон.– М.: МАКС Пресс, 2009.–344с.
4. Бондарев, Э.А. Температурный режим нефтяных и газовых скважин / Э.А.Бондарев, Б.А.Красовицкий.– Новосибирск.:Наука, 1974.–88с.
5. Билюшов, В.М. Математическая модель образования гидратов при течении влажного газа в трубах / В.М.Билюшов // ИФЖ.– 1984.–Т. 46, №1.– С.57-63.
6. Шамсиев, М.Н. Моделирование гидратообразования в стволе вертикальной газовой скважины / М.Х.Хайруллин, М.Н.Шамсиев, П.Е.Морозов, Л.А.Тулупов // Вычисл. технологии.–2008.–Т.13, №5.– с. 88–94
7. Аргунова, К.К. Математическое моделирование образования гидратов в газовых скважинах / К.К.Аргунова, Э.А.Бондарев, И.И.Рожин // Научный журнал Криосфера Земли.–2011.–Т. XV, №2.–с.65–69
8. Гуревич, Г.Р. Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей / Г.Р.Гуревич, А.И.Брусиловский.– М.:Недра, 1984.–264с.
9. Макогон, Ю.Ф. Предупреждение образования гидратов при добыче и транспорте газа / Ю.Ф.Макогон, Г.А.Саркисьянц.–М.:Недра, 1966.– 58с.
10. Сатрутдинова, А.М. Численное моделирование тепломассопереноса в газопроводах / А.М.Сатрутдинова, М.Н.Шамсиев // Материалы итоговой образовательно-научной конференции студентов Казанского Университета Казань.–2012.
11. Сатрутдинова, А.М. Численное моделирование движения влажного газа в стволе вертикальной скважины / А.М.Сатрутдинова, М.Н.Шамсиев //

Актуальные проблемы физико-математических и гуманитарных наук: материалы Международной научно-технической студенческой конференции (Казань – Зеленодольск, 28–29 ноября 2013 г.). – Казань: Казан. ун–та.–2014.– с.74–77

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;
    Chart1: TChart;
    Series1: TLineSeries;
    Chart2: TChart;
    Series2: TLineSeries;
    Chart3: TChart;
    Series3: TLineSeries;
    Chart4: TChart;
    Chart5: TChart;
    Chart6: TChart;
    Series5: TLineSeries;
    Series6: TLineSeries;
    Series4: TLineSeries;
    Series7: TLineSeries;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
```

```
    private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
Procedure Plotnost();
Procedure Coef_z();
Procedure Pressure();
Procedure Temperature();
procedure Vlaznost();
procedure nach();
var
  Form1: TForm1;
  F  : TextFile;
   Pl,Pres,tetta,tettan,Temp,zz,Pln,Tf:array of real;
    Prest, Tempt, tettat,Eps,Eta,Presn:array of real;
   x, Tn,Tempn:array of real;
   G, P0, T0, alpha, R,tetta0,Rt,Af,Bf:real;
z0,M,rw,alphaF,tay,lambdaWB,rWF,lambda,Cp,Fi,a,delta,Re,mu,lambdaF,Nu,
Pr:real;
 ch:integer;
const
Col_x=1001;
Col_t=120;
h_x=1;
implementation
{$R *.dfm}
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
i, j:integer; vv:array of real;
```

```
begin
for i:=1 to Col_x do
  begin
  Tn[i]:=T0-x[i]*G;
  Tempn[i]:=Tn[i];
  Temp[i]:=Tn[i];
  Pl[i]:=1e5*P0/(R*Temp[i]);
  Pln[i]:=Pl[i];
  Pres[i]:=P0-Pl[i]*9.8*1e-5*x[i];
  Presn[i]:=Pres[i];
  tetta[i]:=tetta0;
  tettan[i]:=tetta0;
   end;
SetLength(vv,Col_x+1);
for i:=1 to Col_x do vv[i]:=P0;
     Prest[0]:=Pres[Col_x];
     Tempt[0]:=Temp[Col_x];
     tettat[0]:=tetta[Col_x];
for j:=1 to Col_t do
  begin
  Rt:=sqrt(a*j*tay);
  Edit1.Text:=IntToStr(j);
  ch:=Col_x;
  while (ch>0) do
    begin
   Coef_z();
   Plotnost();
   Pressure();
   Temperature();
   Vlaznost();
```

```
      ch:=0;
    for i:=1 to Col_x do
      begin
        if (abs(vv[i]-Pres[i])>0.00001) then ch:=ch+1;
        vv[i]:=Pres[i];
      end;
   end;
  for i:=1 to Col_x do
      begin
        Tempn[i]:=Temp[i];
      end;
     Prest[j]:=Pres[Col_x];
     Tempt[j]:=Temp[Col_x];
     tettat[j]:=tetta[Col_x];
end;
Form1.Series1.Clear;
for i:=1 to Col_x do
Form1.series1.addxy(x[i],Pres[i]);
Form1.Series2.Clear;
for i:=1 to Col_x do
Form1.series2.addxy(x[i],Temp[i]);
Form1.Series7.Clear;
for i:=1 to Col_x do
Form1.series7.addxy(x[i],Tf[i]);
Form1.Series3.Clear;
for i:=1 to Col_x do
Form1.series3.addxy(x[i],tetta[i]);
Form1.Series4.Clear;
for j:=1 to Col_t do
Form1.series4.addxy(j,Prest[j]);
```

```
Form1.Series5.Clear;
for j:=1 to Col_t do
Form1.series5.addxy(j,Tempt[j]);
Form1.Series6.Clear;
for j:=1 to Col_t do
Form1.series6.addxy(j,tettat[j]);
end;
procedure nach();
var i, ch:integer; vv:array of real;
begin
  SetLength(vv,Col_x+1);
  for i:=1 to Col_x do
     begin
     vv[i]:=P0; Pl[i]:=P0/(R*T0);
     end;
  ch:=Col_x;
  while (ch>0) do
  begin
  Pres[i]:=P0-Pl[i]*9.8*1e5*x[i];
  Coef_z(); Plotnost();
  ch:=0;
  for i:=1 to Col_x do
      if (abs(vv[i]-Pres[i])>0.00001) then ch:=ch+1;
  end;
end;
procedure Plotnost();
 var i:integer;
  begin
    for i:=1 to Col_x do
      Pl[i]:=(100000*Pres[i])/(zz[i]*R*Temp[i]);
```

```
  end;
procedure Coef_z();
var i:integer;
  begin
    for i:=1 to Col_x do
   z[i]:=exp((Pres[i]/45.8)*Ln(0.17376*Ln(Temp[i]/190.5)+0.73))+0.1*(Pres[i]/45.8);
  end;
procedure Pressure();
var i:integer;
 begin
Re:=(M*2*rw)/(Pi*rw*rw*mu);
Fi:=0.11*exp(0.25*Ln((delta/(2*rw))+(68/Re)));
for i:=2 to Col_x do
Pres[i]:=Pres[i-1]-
((9.8*Pl[i]+((sqrt(Pi)*Fi*M*M)/(4*Pl[i]*exp(2.5*Ln(Pi*rw*rw)))))*h_x)*1e-5;
 end;
procedure Temperature();
var
a2,b2,c2,d2,f2:real;
i:integer;
begin
Pr:=(mu*Cp)/lambdaF;
Nu:=0.021*exp(0.8*ln(Re))*exp(0.43*ln(Pr));
alphaF:=Nu/(lambdaF*2*rw);
alpha:=1/((1/alphaF)+((rw/lambdaWB)*Ln(rWF/rw))+((rWF/lambda)*Ln(Rt/rWF)));
  Temp[1]:=T0;
  for i:=1 to Col_x do  Tf[i]:=Af*Ln(1.e5*Pres[i])+Bf;
  for i:=2 to Col_x do
  begin
    Eps[i]:=-0.02;
```

```
    Eta[i]:=0.014;
    a2:=M/(Pl[i]*Pi*rw*rw);
    b2:=Eps[i]*(Pres[i]-Pres[i-1])/h_x ;
    c2:=(4*alpha)/(Cp*2*rw*Pl[i]);
    d2:=9.8/Cp;
    f2:=Eta[i]*(Pres[i]-Presn[i])/tay;
    Temp[i]:=((Tempn[i]/tay)+(a2*Temp[i-1]/h_x)-a2*b2-
a2*d2+f2+c2*Tn[i])/((1/tay)+(a2/h_x)+c2);
 end;
end;
procedure Vlaznost();
var i:integer; //a3:real;
begin
for i:=2 to Col_x do
begin
tetta[i]:=(((Pi*rw*rw*Pl[i]*tettan[i])/tay)+((M*tetta[i-
1])/h_x))/((((Pi*rw*rw)*(2*Pl[i]-Pln[i]))/tay)+(M/h_x));
end;
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
var i:integer;
begin
SetLength(Tempn,Col_x+1);
SetLength(Pl,Col_x+1);
SetLength(Pln,Col_x+1);
SetLength(Temp,Col_x+1);
SetLength(Pres,Col_x+1);
SetLength(x,Col_x+1);
SetLength(Tn,Col_x+1);
SetLength(zz,Col_x+1);
```

```
SetLength(tetta,Col_x+1);
SetLength(tettan,Col_x+1);
SetLength(Eps,Col_x+1);
SetLength(Eta,Col_x+1);
SetLength(Presn,Col_x+1);
SetLength(Prest,Col_t+1);
SetLength(Tempt,Col_t+1);
SetLength(tettat,Col_t+1);
SetLength(Tf,Col_x+1);
  for i:=1 to Col_x do
    begin
      x[i]:=(i-1)*h_x;
    end;
P0:=132.2;
T0:=289.58571;
R:=520;
G:=0.01;
M:=50;
rw:=0.1;
lambdaWB:=50;
rWF:=0.11;
lambda:=1.163;
lambdaF:=0.0072;
Cp:=2093;
tay:=3600;
a:=0.0012641;
delta:=0.0002;
mu:=0.012;
tetta0:=1;
z0:=1;
```

```
Af:=10.036;
Bf:=125.023;
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
var i:integer;
begin
if SaveDialog1.Execute then
  begin
  AssignFile(F, SaveDialog1.FileName);
  Rewrite(F);
  for i:=1 to Col_x  do writeln(F
                              ,(1000-x[i]):7:3
                              ,Pres[i]:12:5
                              ,Temp[i]:12:5
                               ,tetta[i]:12:5
                             ,Tf[i]:12:5
                              ,Tn[i]:12:5
                            );
 for i:=0 to Col_t  do writeln(F
                             ,i:7
                             ,Prest[i]:12:5
                             ,Tempt[i]:12:5
                             ,tettat[i]:12:7
                            );
CloseFile(F);
end;
end;
end.
```