

Выпускная квалификационная работа

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОГИДРАТА В ПЛАСТЕ ПРИ ОТБОРЕ ГАЗА

Выполнил:
студент 4 курса группы ПМИ-41
Галиаскаров А.Р.

Научный руководитель:
к.ф-м.н., доцент
Хасанов М.К.

Цель работы:

- теоретическое изучение особенностей разложения газовых гидратов при тепловом и депрессионном воздействии на пористую среду, частично насыщенную гидратом.

Задачи работы:

- изучить теоретические аспекты образования и существования газогидратов;
- построить аналитические решения плоскоодномерной задачи разложения газогидрата при депрессионном воздействии, позволяющие оценить давления и температуры на границе фазовых переходов и в зоне разложения;
- проанализировать результаты моделирования

Кратко о газогидратах

- Газовые гидраты – кристаллические соединения, образующиеся при определенных термобарических условиях из воды и газа.
- В общем виде состав газовых гидратов описывается формулой $M \cdot nH_2O$, где M – молекула газа-гидратообразователя, n – число, показывающее количество молекул воды, приходящихся на одну молекулу газа



3 структуры газогидрата

- У структуры I решетка, кубической сингонии; элементарная ячейка состоит из 2 малых и 6 больших полостей.
- У структуры II решетка, кубической сингонии; в элементарной ячейке 16 малых и 8 больших полостей.
- Также известна гексагональная структура гидрата (H), в ней имеется два типа малых полостей и один тип большой.

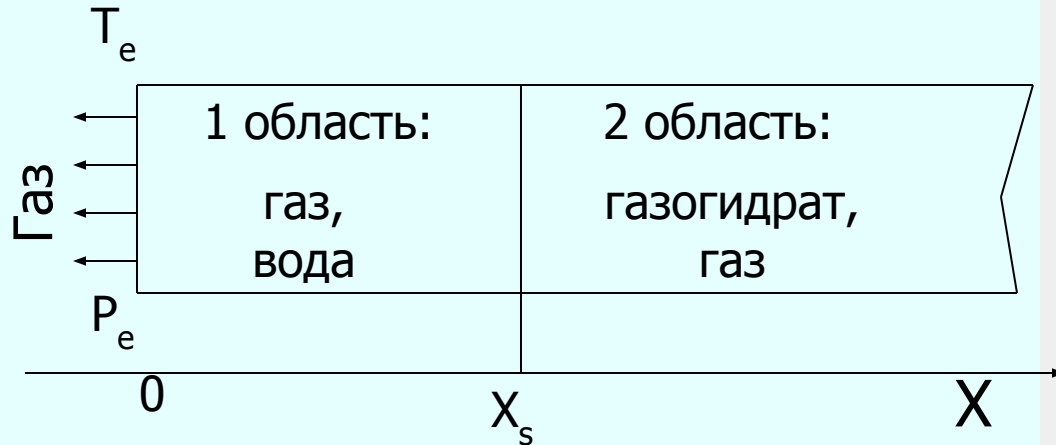


Использование газогидрата

- Газогидрат - самый богатый на нашей планете источник углеводородного газа
- Также использование газогидрата, может повлечь ряд экологических проблем



Постановка задачи



Основные допущения:

1. Пористость постоянна.

Условие фазового равновесия

$$T_{(s)} = T_0 + T_* \ln \left(\frac{p_{(s)}}{p_{s0}} \right)$$

2. Скелет пористой среды, гидрат и вода несжимаемы и неподвижны.

3. Модель однотемпературная: температура газа, жидкости, гидрата и пористой среды в каждой точке совпадают.

4. Гидрат является двухкомпонентной системой

Основные уравнения

1. Уравнение сохранения массы газа $mS_{g(i)} \frac{\partial \rho_{g(i)}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (mS_{g(i)} \rho_{g(i)} v_{g(i)}) = 0$

$S_{g(i)}$ - газонасыщенность

$v_{g(i)}$ - массовая скорость потока газа

2. Закон Дарси: $mS_{g(i)} v_{g(i)} = - \frac{k_{(i)}}{\mu_g} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial x}$

$S_{g(i)}$ - газонасыщенность

$v_{g(i)}$ - массовая скорость потока газа

3. Газ считаем калорически совершенным: $p_{(i)} = \rho_{g(i)} R_g T_{(i)}$

4. Уравнение притока тепла, пренебрегая баротермическим эффектом:

$S_{g(i)}$ - газонасыщенность

$v_{a(i)}$ - массовая скорость потока газа

λ - коэффициент теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T_{(i)}}{\partial t} + \rho_{g(i)} c_g m S_{g(i)} v_{g(i)} \frac{\partial T_{(i)}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_{(i)}}{\partial x} \right)$$

$$\rho c = (1 - m) \rho_s c_s + m S_g \rho_g c_g + m S_l \rho_l c_l + m S_h \rho_h c_h$$

$$\lambda = (1 - m) \lambda_s + m S_g \lambda_g + m S_l \lambda_l + m S_h \lambda_h$$

Начальные и граничные условия

Уравнения баланса массы и тепла на границе фазового перехода:

$$m v \rho_h^0 (1 - g) \dot{x}_s = m S_{l(1)} \rho_l^0 \dot{x}_s \quad \lambda_{(2)} \frac{\partial T_{(2)}}{\partial x} - \lambda_{(1)} \frac{\partial T_{(1)}}{\partial x} = m v \rho_h^0 l \dot{x}_s$$

$$m \left[(1 - v) \rho_{g(s)}^0 (v_{g(2)} - \dot{x}_s) - v \rho_h^0 g \dot{x}_s \right] = m S_{g(1)} \rho_{g(s)}^0 (v_{g(1)} - \dot{x}_s)$$

$S_{g(i)}$ - газонасыщенность

$v_{g(i)}$ - массовая скорость потока газа

Условие фазового равновесия:

$$T_{(s)} = T_0 + T_* \ln \left(\frac{p_{(s)}}{p_{s0}} \right)$$

Давление и температура в начальный момент времени:

$$p_{(2)} = p_0, \quad T_{(2)} = T_0, \quad (t = 0, \quad x \geq 0)$$

Непрерывность давления и температуры на границе фазового перехода:

$$p_{(1)} = p_{(2)} = p_{(s)}, \quad T_{(1)} = T_{(2)} = T_{(s)} \quad (x = x_{(s)})$$

Условия на границе пласта:

$$T_{(1)} = T_e, \quad p_{(1)} = p_e, \quad (t > 0, \quad x = 0)$$

Аналитическое решение

Автомодельная переменная:

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{\aleph^{(T)} t}} \quad \aleph^{(T)} = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Распределение давления:

$$p_{(1)}^2 = p_{(e)}^2 + (p_{(s)}^2 - p_{(e)}^2) \frac{\int_0^\xi \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi}{\int_0^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi}, (0 < \xi < \xi_{(s)}), \quad p_{(2)}^2 = p_{(s)}^2 + (p_0^2 - p_{(s)}^2) \frac{\int_{\xi_{(s)}}^\xi \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}{\int_{\xi_{(s)}}^\infty \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}, (\xi_{(s)} < \xi < \infty)$$

Распределение температуры:

$$T_{(1)} = T_e + \frac{(T_s - T_e) \int_0^\xi \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(1)}}{2} p_{(1)}^2\right) d\xi}{\int_0^{\xi_s} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(1)}}{2} p_{(1)}^2\right) d\xi} \quad T_{(2)} = T_s + \frac{(T_0 - T_s) \int_{\xi_s}^\xi \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(2)}}{2} p_{(2)}^2\right) d\xi}{\int_{\xi_s}^\infty \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(2)}}{2} p_{(2)}^2\right) d\xi}$$

Перейдем к автомодельной переменной:

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \frac{d}{d\xi} = -\frac{1}{2} \frac{x}{t\sqrt{\aleph^{(T)}t}} \frac{d}{d\xi}, \quad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{d}{d\xi} = \frac{1}{\sqrt{\aleph^{(T)}t}} \frac{d}{d\xi}$$

Тогда координата границы и скорость ее движения:

$$x_s = \xi_s \sqrt{\aleph^{(T)}t}, \quad \dot{x}_s = \frac{\xi_s}{2} \frac{\aleph^{(T)}}{\sqrt{\aleph^{(T)}t}}$$

На основе уравнения неразрывности, используя закон Дарси (2) с учетом, что газ является калорически совершенным (3), получим уравнение пьезопроводности:

$$\frac{\partial p_{(i)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p_{(i)}}{m_{(i)}} \frac{k_{(i)}}{\mu_g} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial x} \right)$$

Уравнение притока тепла, используя закон Дарси, можно преобразовать к следующему виду:

$$\frac{\partial T_{(i)}}{\partial t} = \aleph^{(T)} \frac{\partial^2 T_{(i)}}{\partial x^2} + \frac{\rho_{g(i)} c_g}{\rho c} \frac{k_{(i)}}{\mu_g} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial x} \frac{\partial T_{(i)}}{\partial x}$$

$$\aleph^{(T)} = \frac{\lambda}{\rho c} \quad - \text{коэффициент температуропроводности}$$

Из уравнения Баланса массы, учитывая равенство $S_{g(1)} + S_{l(1)} = 1$ получим:

$$S_{g(1)} = 1 - S_{l(1)} = 1 - \frac{\nu \rho_h^0 (1 - g)}{\rho_l^0}$$

Тогда учитывая последнее уравнение и уравнение закона сохранения массы, применив закон Дарси можно записать:

$$-\frac{k_{(2)}}{\mu_{g(2)}} \frac{\partial p_{(2)}}{\partial x} + \frac{k_{(1)}}{\mu_{g(1)}} \frac{\partial p_{(1)}}{\partial x} = mv \left(\frac{\rho_h^0 g}{\rho_{g(s)}^0} + \frac{\rho_h^0 (1 - g)}{\rho_l^0} - 1 \right) \dot{x}_s$$

Запишем уравнение пьезопроводности в автомодельных переменных:

$$-\xi \frac{dp_{(i)}}{d\xi} = \frac{2}{\aleph^{(T)}} \frac{d}{d\xi} \left(\frac{k_{(i)}}{\mu_g m_{(i)}} p_{(i)} \frac{dp_{(i)}}{d\xi} \right)$$

Применяя метод линеаризации Лейбензона, уравнение запишем в виде:

$$-\xi \frac{dp_{(i)}^2}{d\xi} = 2\eta_{(i)} \frac{d}{d\xi} \left(\frac{dp_{(i)}^2}{d\xi} \right)$$

где

$$\eta_{(i)} = \frac{\aleph_{(i)}^{(p)}}{\aleph^{(T)}} \quad \aleph_{(i)}^{(p)} = \frac{k_{(i)}}{\mu_g m_{(i)}} p_0$$

Введем обозначение $p_{\xi(i)} = \frac{dp_{(i)}^2}{d\xi}$. Тогда последнее уравнение запишется в виде: $\frac{dp_{\xi(i)}}{d\xi} + \frac{\xi}{2\eta_{(i)}} p_{\xi(i)} = 0$

Это уравнение с разделяющимися переменными. Разделим переменные и проинтегрируем:

$$\int \frac{dp_{\xi(i)}}{p_{\xi(i)}} = -\frac{1}{2\eta_{(i)}} \int \xi d\xi$$

$$p_{\xi(i)} = \frac{dp_{(i)}^2}{d\xi} = C_{i(p)} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(i)}}\right)$$

Отсюда:

$$p_{(1)}^2 = D_{1(p)} + C_{1(p)} \int_0^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi$$

$$p_{(2)}^2 = D_{2(p)} + C_{2(p)} \int_{\xi_{(s)}}^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi$$

Коэффициенты $C_{i(p)}$ и $D_{i(p)}$ найдем из начальных и граничных условий:

$$\xi \rightarrow 0, \Rightarrow p_{(1)} = p_{(e)} \Rightarrow D_{1(p)} = p_{(e)}^2$$

$$\xi = \xi_{(s)}, \Rightarrow p_{(2)} \rightarrow p_{(s)}, \Rightarrow D_{2(p)} = p_{(s)}^2,$$

$$\xi \rightarrow \infty, \Rightarrow p_{(2)} \rightarrow p_0, \Rightarrow C_{2(p)} = \frac{p_0^2 - p_{(s)}^2}{\int_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi},$$

$$\xi = \xi_{(s)}, \Rightarrow p_{(1)} \rightarrow p_{(s)}, \Rightarrow C_{1(p)} = \frac{p_{(s)}^2 - p_e^2}{\int_0^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi}$$

Тогда для распределения давления в первой и второй зонах получим уравнения:

$$p_{(1)}^2 = p_{(e)}^2 + (p_{(s)}^2 - p_{(e)}^2) \frac{\int_0^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi}{\int_0^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi}, (0 < \xi < \xi_{(s)})$$

$$p_{(2)}^2 = p_{(s)}^2 + (p_0^2 - p_{(s)}^2) \frac{\int_{\xi_{(s)}}^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}{\int_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}. \quad (\xi_{(s)} < \xi < \infty)$$

Запишем уравнение баланса массы газа на границе между зонами в автомодельных переменных:

$$-\frac{k_{(2)}}{\mu_g} \frac{\partial p_{(2)}^2}{\partial \xi} + \frac{k_{(1)}}{\mu_g} \frac{\partial p_{(1)}^2}{\partial \xi} = m v \left[\frac{\rho_h g}{\rho_{g(s)}} + \frac{\rho_h (1-g)}{\rho_l} - 1 \right] \dot{x}_{(s)}, (x = x_{(s)})$$

С учетом полученного решения получим:

$$-k_{(2)} \frac{(p_0^2 - p_{(s)}^2) \exp\left(-\frac{\xi_{(s)}^2}{4\eta_{(2)}}\right)}{\int_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi} + k_{(1)} \frac{(p_{(s)}^2 - p_e^2) \exp\left(-\frac{\xi_{(s)}^2}{4\eta_{(2)}}\right)}{\int_0^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi} = m v \left[\frac{\rho_h g}{\rho_{g(s)}} + \frac{\rho_h (1-g)}{\rho_l} - 1 \right] \dot{x}_{(s)} \mu_g$$

Отсюда после преобразований получаем уравнение для нахождения p_s

$$p_{(s)}^2 = \frac{k_{(2)} A_{\xi} p_0^2 + k_{(1)} B_{\xi} p_e^2}{k_{(2)} A_{\xi} + k_{(1)} B_{\xi}} + \frac{m v \left[\frac{\rho_h g}{\rho_{g(s)}} + \frac{\rho_h (1-g)}{\rho_l} - 1 \right] \dot{x}_{(s)} \mu_g}{k_{(2)} A_{\xi} + k_{(1)} B_{\xi}}$$

Где,

$$A_{\xi} = \frac{\exp\left(-\frac{\xi_{(s)}^2}{4\eta_{(2)}}\right)}{\int_0^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi} \quad B_{\xi} = \frac{\exp\left(-\frac{\xi_{(s)}^2}{4\eta_{(1)}}\right)}{\int_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}$$

Запишем уравнение притока тепла в автомоделных переменных:

$$-\frac{1}{2}\xi \frac{dT_{(i)}}{d\xi} = \frac{d}{d\xi} \left(\frac{dT_{(i)}}{d\xi} \right) + \frac{1}{2}\alpha_{(i)} \frac{dp_{(i)}^2}{d\xi} \frac{dT_{(i)}}{d\xi}$$

где, $\alpha_{(i)} = \frac{\rho_{g0} c_g k_{(i)}}{\lambda p_0 \mu_g}$

Введем обозначение $T_{\xi(i)} = \frac{dT_{(i)}}{d\xi}$

$$\frac{dT_{\xi(i)}}{d\xi} + \left(\frac{\xi}{2} + \frac{\alpha_{(i)}}{2} \frac{dp_{(i)}^2}{d\xi} \right) T_{\xi(i)} = 0$$

Это уравнение с разделяющимися переменными. Разделим переменные и проинтегрируем:

$$\int \frac{dT_{\xi(i)}}{T_{\xi(i)}} = -\frac{1}{2} \int \xi d\xi - \frac{\alpha_{(i)}}{2} \int dp_{(i)}^2$$

$$T_{\xi(i)} = \frac{dT_{(i)}}{d\xi} = C_{i(T)} \exp \left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(i)}}{2} p^2_{(i)} \right)$$

Отсюда $T_{(1)} = D_{1(T)} + C_{1(T)} \int_0^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(1)}}{2} p^2_{(1)}\right) d\xi$ $T_{(2)} = D_{2(T)} + C_{2(T)} \int_{\xi_{(s)}}^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(2)}}{2} p^2_{(2)}\right) d\xi$

Коэффициенты $C_{i(p)}$ и $D_{i(p)}$ найдем из начальных и граничных условий:

$$\xi = \xi_{(s)}, \Rightarrow T_{(2)} \rightarrow T_{(s)}, \Rightarrow D_{2(T)} = T_{(s)}$$

$$\xi \rightarrow \infty, \Rightarrow T_{(2)} \rightarrow T_{(0)}, \Rightarrow C_{2(T)} = \frac{T_0 - T_{(s)}}{\int_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(2)}}{2} p^2_{(2)}\right) d\xi}$$

$$\xi \rightarrow 0, \Rightarrow T_{(1)} \rightarrow T_{(e)}, \Rightarrow D_{1(T)} = T_{(e)}$$

$$\xi = \xi_{(s)} \Rightarrow T_{(1)} \rightarrow T_{(s)}, \Rightarrow C_{1(T)} = \frac{T_{(s)} - T_{(e)}}{\int_0^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(1)}}{2} p^2_{(i)}\right) d\xi}$$

Тогда для распределения температуры в первой и второй зонах получим уравнения:

$$T_{(1)} = T_e + \frac{(T_s - T_e) \int_0^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(1)}}{2} p^2_{(1)}\right) d\xi}{\int_0^{\xi_s} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(1)}}{2} p^2_{(1)}\right) d\xi}$$

$$T_{(2)} = T_s + \frac{(T_0 - T_s) \int_{\xi_s}^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(2)}}{2} p^2_{(2)}\right) d\xi}{\int_{\xi_s}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(2)}}{2} p^2_{(2)}\right) d\xi}$$

Запишем уравнение баланса тепла на границе между зонами в автомоделных координатах:

$$\frac{dT_{(1)}}{d\xi} - \frac{dT_{(2)}}{d\xi} = \frac{mv\rho_h^0 l}{2\rho c} \xi_s$$

Подставив в это уравнение полученные решения, получим:

$$\frac{(T_s - T_e) \exp\left(-\frac{\alpha_{(1)}}{2} p_s^2\right)}{\int_0^{\xi_s} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(1)}}{2} p_{(1)}^2\right) d\xi} - \frac{(T_0 - T_s) \exp\left(-\frac{\alpha_{(2)}}{2} p_s^2\right)}{\int_{\xi_s}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(2)}}{2} p_{(2)}^2\right) d\xi} = \frac{mv\rho_h^0 l}{2\rho c} \exp\left(\frac{\xi_s^2}{4}\right) \xi_s$$

Заменив в этом уравнении p_s и T_s их значениями, получим уравнение для нахождения ξ_s , которое решается численно.

Таким образом, для построения профилей давлений и температур имеем:

$$p_{(1)}^2 = p_e^2 + (p_s^2 - p_e^2) \frac{\int_0^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi}{\int_0^{\xi_s} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi}, \quad (0 < \xi < \xi_s)$$

$$p_{(2)}^2 = p_s^2 + (p_0^2 - p_s^2) \frac{\int_{\xi_s}^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}{\int_{\xi_s}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}, \quad (\xi_s < \xi < \infty)$$

$$T_{(1)} = T_e + \frac{(T_s - T_e) \int_0^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(1)}}{2} p_{(1)}^2\right) d\xi}{\int_0^{\xi_s} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(1)}}{2} p_{(1)}^2\right) d\xi}, \quad (0 < \xi < \xi_s)$$

$$T_{(2)} = T_s + \frac{(T_0 - T_s) \int_{\xi_s}^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(2)}}{2} p_{(2)}^2\right) d\xi}{\int_{\xi_s}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(2)}}{2} p_{(2)}^2\right) d\xi}. \quad (\xi_s < \xi < \infty)$$

Нахождение граничных параметров

Условие баланса тепла:

$$\frac{(T_s - T_e) \exp\left(-\frac{\alpha_{(1)}}{2} p_s^2\right)}{\int_0^{\xi_s} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(1)}}{2} p_{(1)}^2\right) d\xi} - \frac{(T_0 - T_s) \exp\left(-\frac{\alpha_{(2)}}{2} p_s^2\right)}{\int_{\xi_s}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\alpha_{(2)}}{2} p_{(2)}^2\right) d\xi} = \frac{m v \rho_h^0 l}{2 \rho c} \exp\left(\frac{\xi_s^2}{4}\right) \xi_s$$

Условие баланса массы:

$$-\frac{k_{(2)}}{\mu_g} \frac{\partial p_{(2)}^2}{\partial \xi} + \frac{k_{(1)}}{\mu_g} \frac{\partial p_{(1)}^2}{\partial \xi} = m v \left[\frac{\rho_h g}{\rho_{g(s)}} + \frac{\rho_h (1-g)}{\rho_l} - 1 \right] \dot{x}_{(s)}, (x = x_{(s)})$$

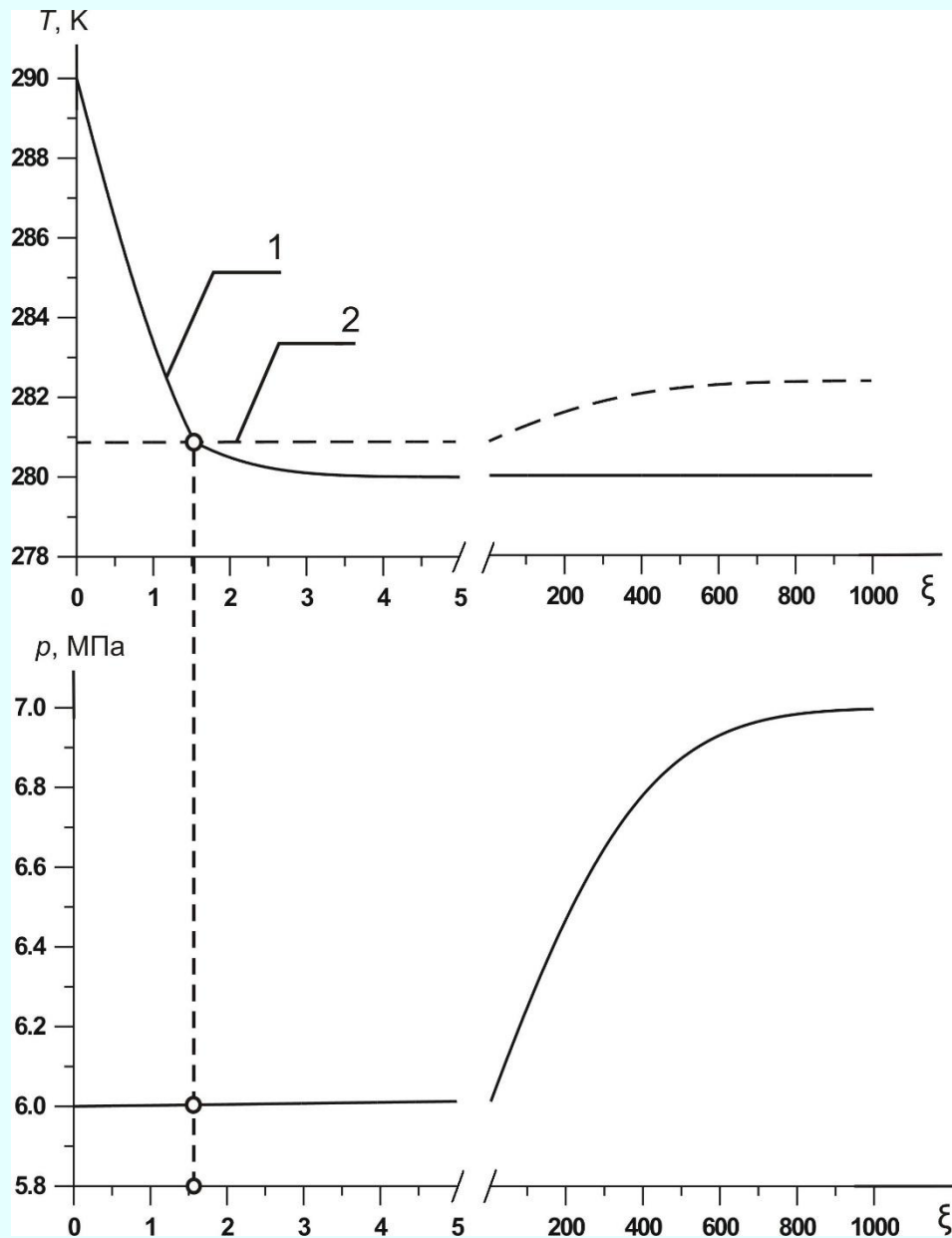
Условие фазового равновесия:

$$T_{(s)} = T_0 + T_* \ln\left(\frac{p_{(s)}}{p_{s0}}\right)$$

$$\aleph^{(T)} = \frac{\lambda}{\rho c} \quad \alpha_{(i)} = \frac{\rho_{g0} c_g k_{(i)}}{\lambda p_0 \mu_g}$$

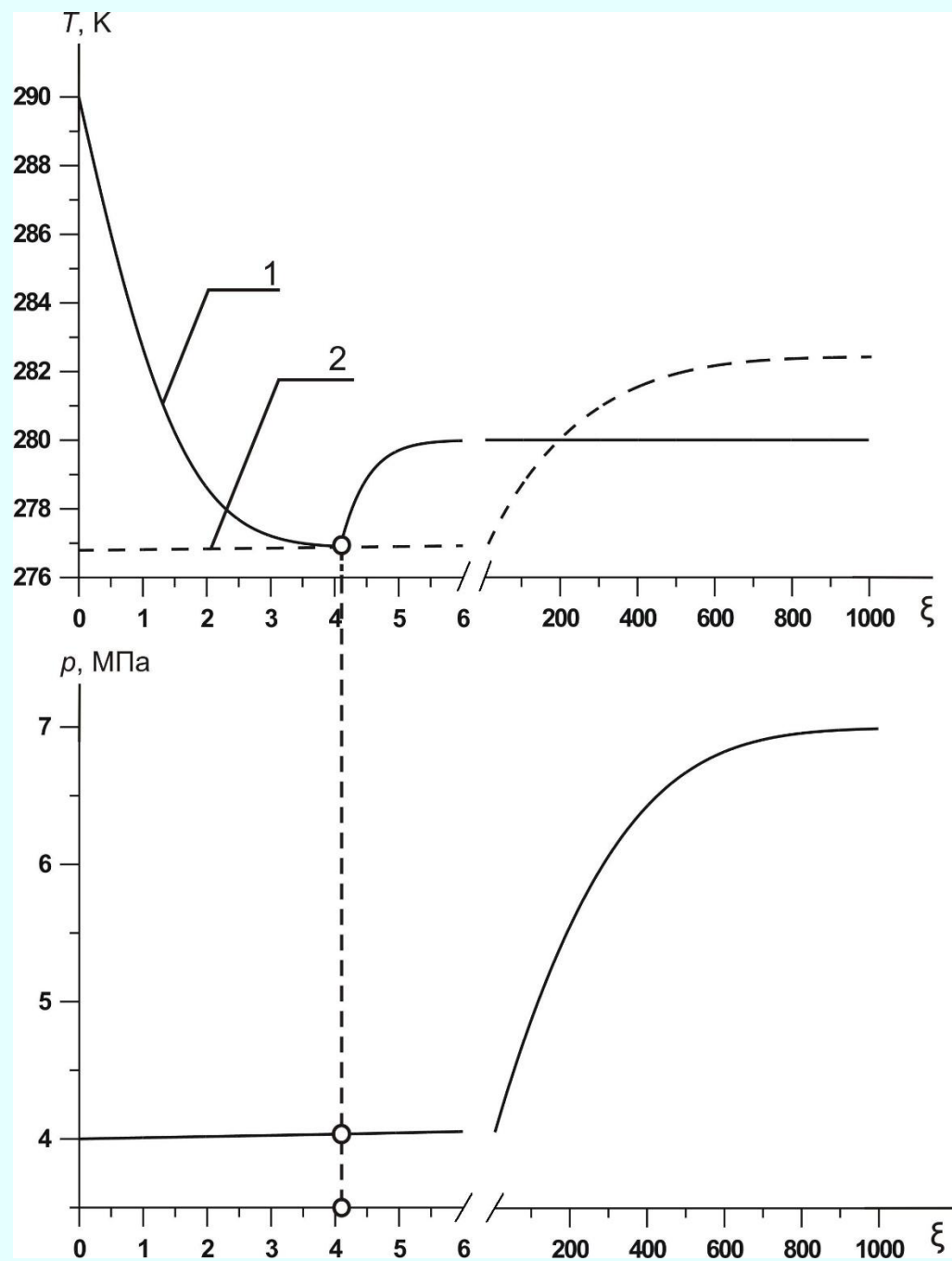
Результаты [расчётов](#)

Результаты моделирования



$S_{g(i)}$ - газонасыщенность

$v_{g(i)}$ - массовая скорость потока газа



$S_{g(i)}$ - газонасыщенность

$v_{g(i)}$ - массовая скорость потока газа

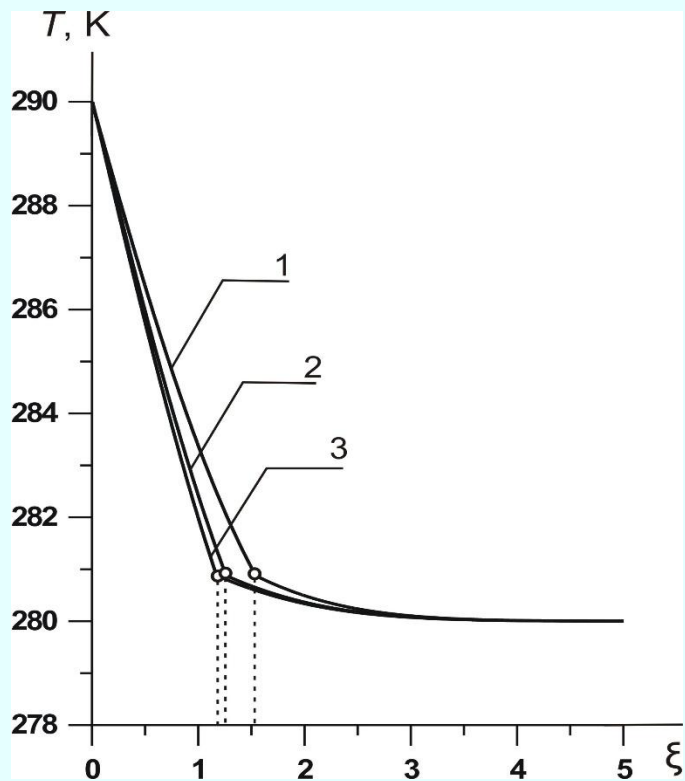


Рис 3. Распределение температуры при различных значениях гидратонасыщенности.
 $v = 0.2$ (1), $v = 0.4$ (2), $v = 0.5$ (3),
 $p_o = 7$ МПа, $p_e = 6$ МПа.

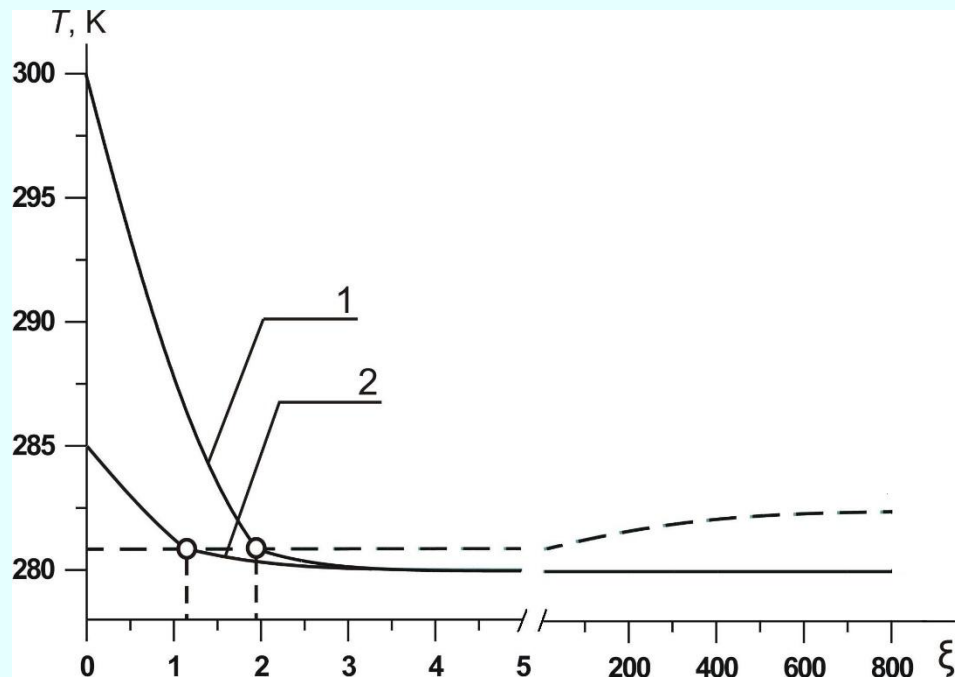


Рис 4. Распределение температуры при $p_o = 7$ МПа, $p_e = 6$ МПа. Линия 1 при $T_e = 300$ К, линия 2 при $T_e = 285$ К. Пунктирная линия соответствует равновесной температуре.

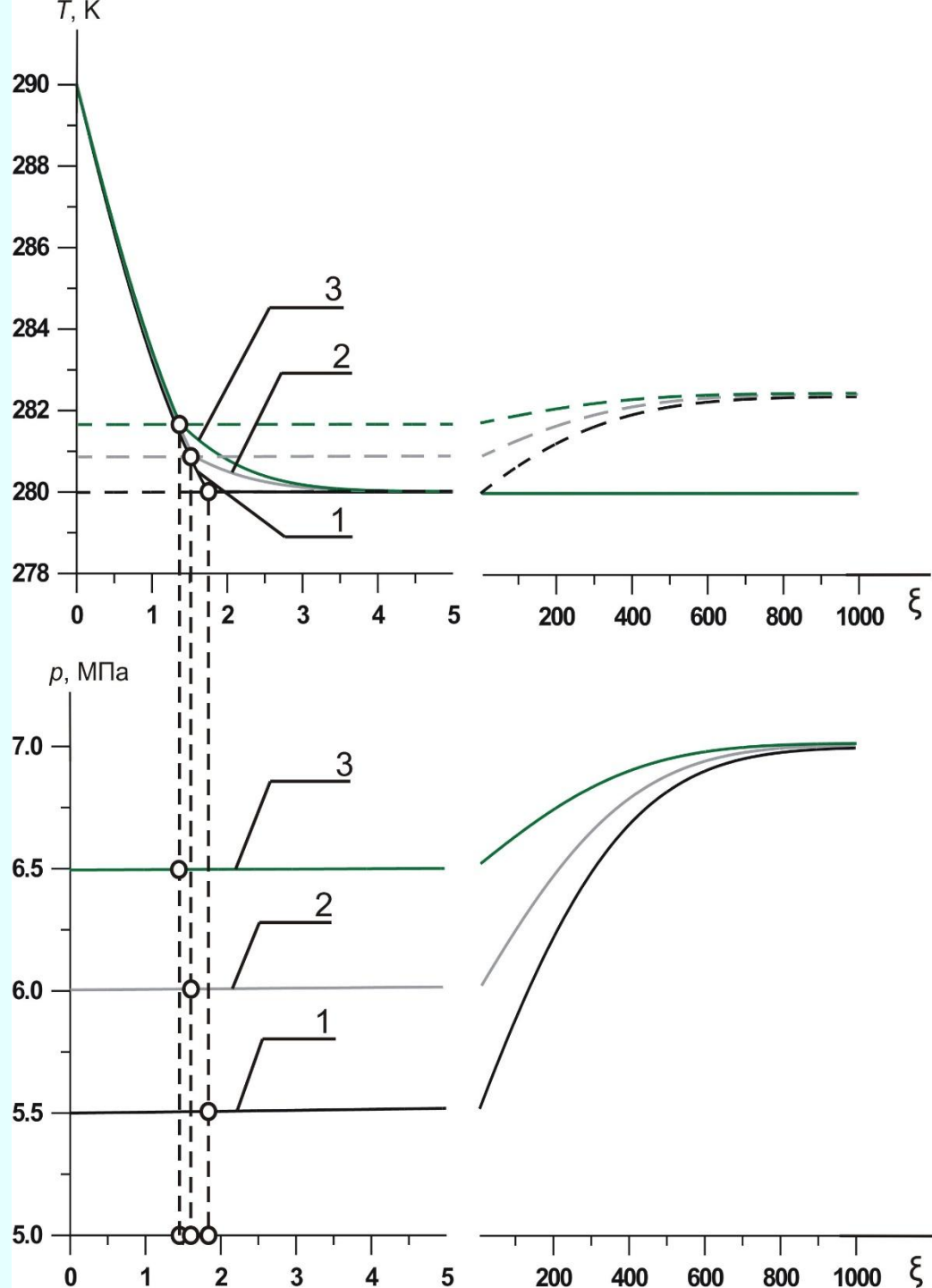


Рис 5. Распределения температуры и давления. ($p_e = 5,5 \text{ МПа}$ (1); 6 МПа (2); $6,5 \text{ МПа}$ (3)).

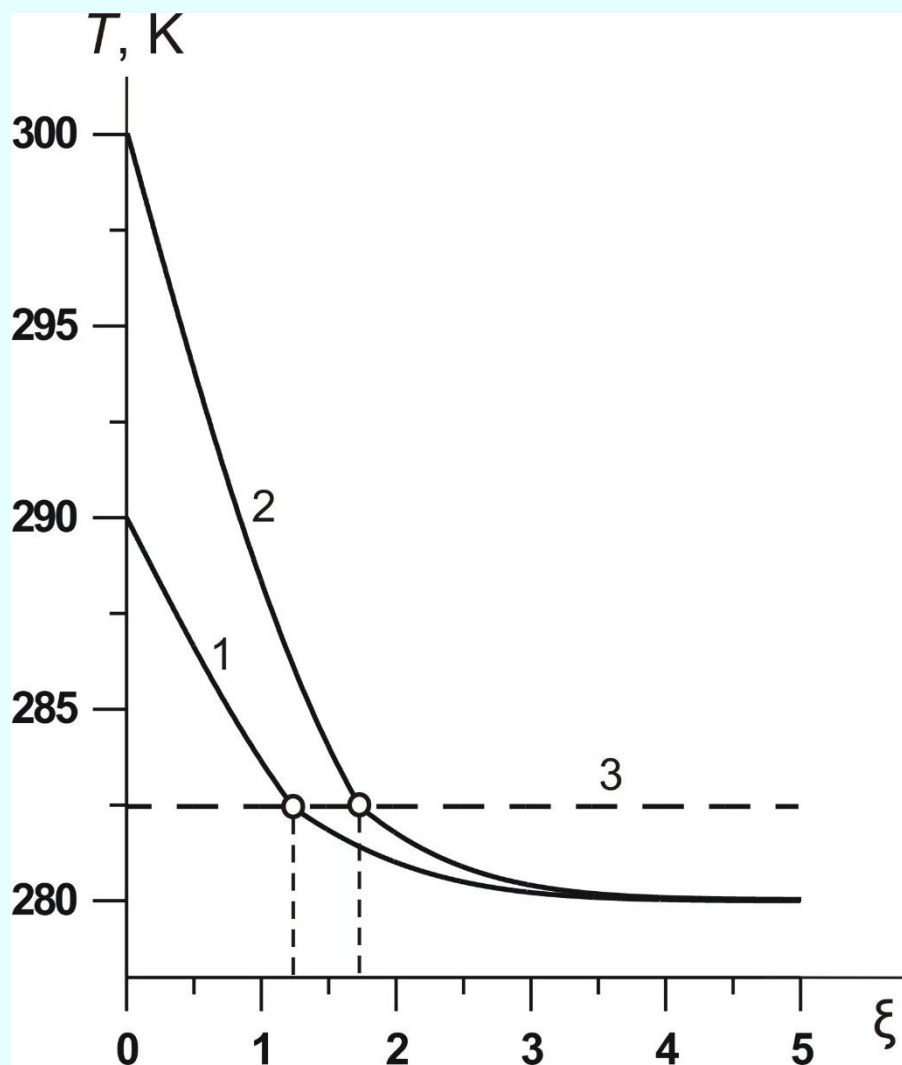
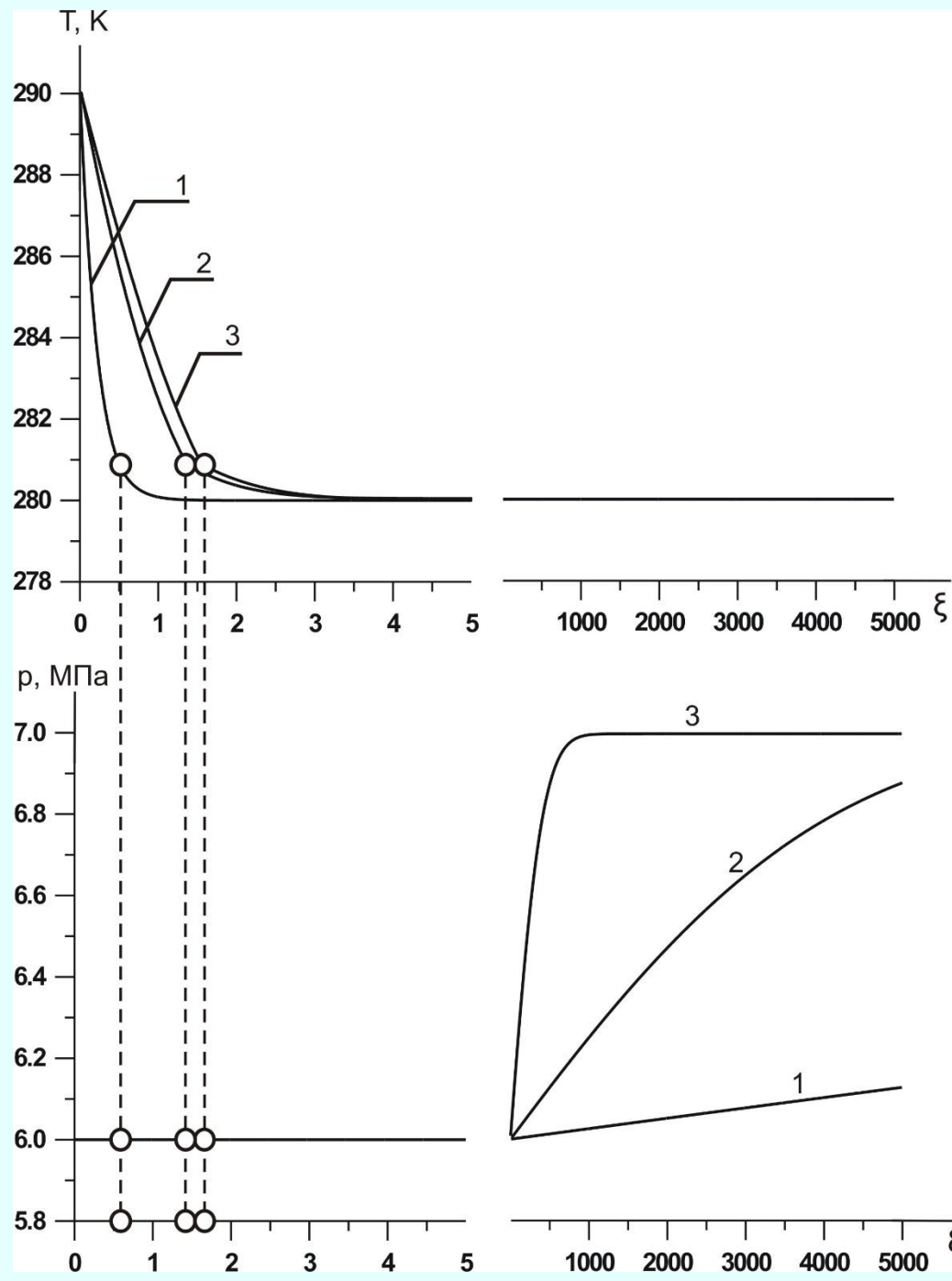


Рис 6. Распределения температуры для случая, когда разложение идёт только за счёт нагревания.

Линии 1 и 2 соответствуют значениям $T_e = 290; 300$ K.



$S_{g(i)}$ - газонасыщенность

$v_{g(i)}$ - массовая скорость потока газа