

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В ГАЗОПРОВОДАХ

Хайруллин М.Х., Шамсиев М.Н., Тулупов Л.А.

*Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН*

*Предложен новый подход для моделирования образования и разложения гидратов в трубопроводе. Разработан численный алгоритм расчета тепловых процессов в системе «трубопровод – окружающая среда». Проведен численный анализ.*

В данной работе рассматривается процесс образования и разложения гидрата на стенках трубопровода при транспортировке газа в рамках задачи Стефана. При построении математической модели данного процесса используются уравнения переноса газа в трубопроводе, уравнение теплопроводности в окружающей среде.

Будем считать, что свободной влаги, необходимой для образования гидрата, достаточно по всей длине трубы. Толщина гидратного слоя  $\xi(x,t)$  меняется по длине трубы. На входе задаются температура  $T_0$ , давление  $p_0$  и массовый расход газа  $M$ . В начальный момент времени считаются известными поперечное сечение  $S(x) = \pi[R_0 - \xi(x,t)]^2$  трубы и температура окружающей среды.

Процесс теплообмена между газовым потоком в канале переменного сечения и окружающей средой описывается следующей системой [1,2]:

$$\frac{dp}{dx} = -\rho g \sin \varphi - \frac{\sqrt{\pi} \psi M^2}{4 \rho S^{2,5}}, \quad x \in (0, L], \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\pi D \alpha_1 (T_1 - T)}{c_p M} - g \sin \varphi / c_p - \varepsilon \frac{dp}{dx}, \quad x \in (0, L], \quad (2)$$

$$\rho = p / zRT, \quad (3)$$

$$T_\phi(p) = \beta_1 \ln p + \beta_2, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \kappa_n \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_n}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} \right], \quad x \in (0, L), \quad (5)$$

$$T_n(r, x, 0) = T_{n0}, \quad (6)$$

$$-\lambda_n r \frac{\partial T_n}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = R_0 \alpha (T - T_n), \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial T_n}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0, \quad T_n \Big|_{r=R_k} = T_{n0} \quad (9)$$

$$\alpha_1 = (1 - I_\xi) \alpha_c + I_\xi \alpha_z, \quad T_1 = (1 - I_\xi) T_n(R_0, x, t) + I_\xi T_\phi, \quad I_\xi = \begin{cases} 0, & \xi = 0, \\ 1, & \xi \neq 0, \end{cases}, \quad \alpha = \left[ \frac{1}{\alpha_c} + \frac{\xi}{\lambda_z} \right]^{-1}$$

Здесь  $p$ ,  $T$ ,  $z$  – давление, температура, сверхсжимаемость газа;  $R_0$  – радиус трубопровода;  $\phi$  – угол наклона трубы к горизонту;  $c_p$  – удельная теплоемкость газа;  $\psi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $R$  – газовая постоянная;  $\alpha_c$  – коэффициент теплообмена между трубой и с окружающей средой;  $\lambda_z$  – теплопроводность гидрата;  $\alpha_z$  – коэффициент теплообмена между газом и гидратом;  $T_\phi$  – температура фазового перехода,  $\beta_1, \beta_2$  – эмпирические коэффициенты;  $T_n$ ,  $\lambda_n$ ,  $\kappa_n$  – температура, теплопроводность, температуропроводность окружающей среды;  $T_{n0}$  – начальная температура окружающей среды.

Граница раздела газ – гидрат описывается уравнением [3]:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\lambda_z (T_\phi - T_n)}{\rho_z l R_0 \left[ \frac{\lambda_z}{\alpha_c R_0} + \ln \left( 1 - \frac{\xi}{R_0} \right) \right] \left( 1 - \frac{\xi}{R_0} \right)} + \frac{\alpha_z (T_\phi - T)}{\rho_z l}. \quad (10)$$

Условие (10) позволяет, в отличие от уравнения полученного в [1], численно моделировать замерзание и разложение гидрата в трубе не предполагая существования начального слоя гидрата. Система уравнений (1)-(10) решается методом конечных разностей.

Далее приводятся результаты численных расчётов при следующих данных:  $L = 100$  км,  $D = 1.4$  м,  $p_0 = 7,5$  МПа,  $T_0 = 300$  К,  $M = 1000$  кг/с,  $T_{n0}$

$= 263 \text{ K}$ , состав газа – чистый метан,  $\rho_2 = 800 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda_2 = 2 \text{ Дж/м с К}$ ,  $l = 5,1 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ ,  $\beta_1 = 10$ ,  $\beta_2 = 234,2$ ,  $\lambda_n = 1,3 \text{ Дж/м с К}$ ,  $\alpha_2 = 200 \text{ Дж/м}^2 \text{ с К}$ ,  $\alpha = 5 \text{ Дж/м}^2 \text{ с К}$  [1].

На рис. 1, 2 приведены распределения гидратного слоя, температуры газа и фазового перехода по длине трубы на разные моменты времени. Образование гидрата происходит на участках где температура газа ниже температуры фазового перехода (рис. 1). Существует переходная зона, где температура газа резко снижается до температуры фазового перехода, в который происходит разложение гидрата (рис. 1). Гидратный слой начинается образовываться на некотором расстоянии от входного сечения, причем со временем его передняя кромка перемещается к выходу при увеличивающейся толщине (рис.2). В отличие от результатов, приведенных в [1], максимальная толщина гидратного слоя будет на выходе. Со временем толщина гидратного слоя уменьшается до полного исчезновения (рис.2, кривая 7). При этом давление на выходе падает, достигая в некоторый момент времени минимума, а затем возрастает по мере исчезновения гидратного слоя и прогрева окружающей среды. Для данного варианта расчета время существования этого слоя составило около 18 суток.

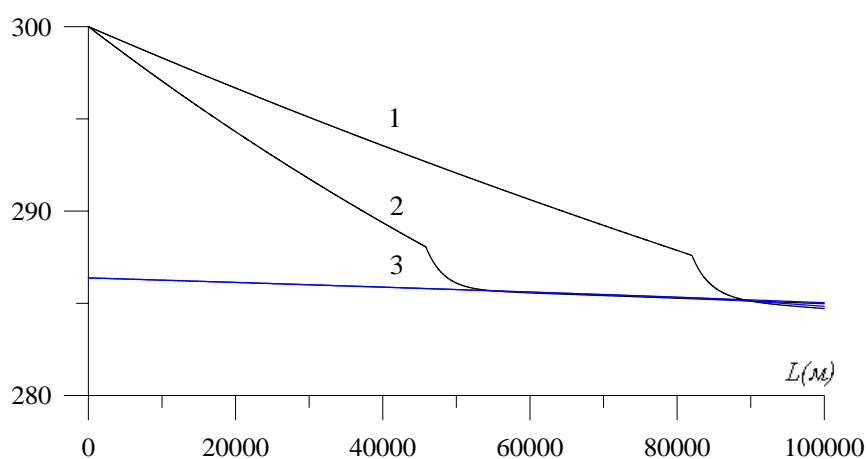


Рис.1.  
 Распределение температуры в трубе: 1) 1 ч.; 2) 120 ч.  
 3) Распределение фазовой температуры.

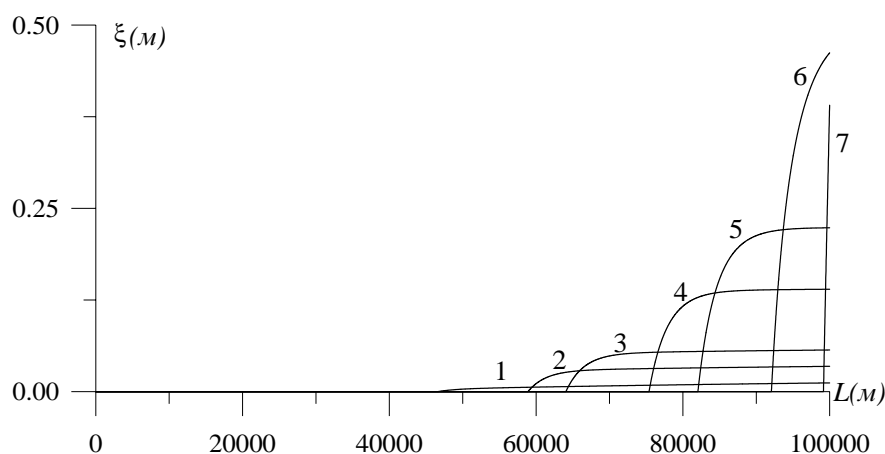


Рис.2. Распределение гидратного слоя.  
 1)  $t = 1$  ч.; 2) 12 ч.; 3) 1 сут.; 4) 3 сут.; 5) 5 сут.; 6) 10 сут.; 7) 17 сут.

### Литература

1. Бондарев Э.А., Васильев В.И., Воеводин А.Ф., Павлов Н.Н., Шадрин А.П. Термогидродинамика систем добычи и транспорта газа. М.: Наука, 1988. – 270 с.
2. Кортаев Ю.П., Кривошеин Б.Л., Новаковский В.Н. Термодинамика газопромысловых систем. М.: Недра, 1991. – 275 с.
3. Тулупов Л.А. Шамсиев М.Н. Математическое моделирование образования гидратов в трубопроводе. //Труды математического центра имени Н.И. Лобачевского. Т21. Казань: Казанское математическое общество, 2003. С. 216 – 217.