

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ВЫСОКОГОРНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Чалый К.Е.

РТУ МИРЭА, Институт информационных технологий

Аннотация: В статье рассматриваются теоретические аспекты математического моделирования трубопроводного транспорта газа, на основе которых формулируется численный метод расчета параметров работы газопроводов. В качестве примера применения рассматриваемого метода рассчитаны и описаны параметры работы высокогорного газопровода «Дзуарикау-Цхинвал».

Ключевые слова: трубопроводный транспорт газа, математическое моделирование, численные методы.

Введение. Россия обладает значительными энергетическими ресурсами, особенно природным газом. Важной задачей является транспортировка газа, учитывая территориальные масштабы страны. В работе основное внимание уделено трубопроводной транспортировке газа, преодолевающей природные барьеры, такие как горы. Для оптимизации работы газопроводов, особенно высокогорных, требуется применение точных инженерных расчётов и математических программ. В контексте этого в данной работе рассмотрен численный метод расчёта установившегося неизотермического течения газа в газопроводе с произвольным профилем, который применен в качестве примера к самому высокогорному газопроводу в мире – газопроводу «Дзуарикау-Цхинвал».

Основная часть. Для расчета режимов работы газопроводов используются основные уравнения механики и термодинамики. Рассмотрим некоторые из них [1].

Уравнение неразрывности или закон сохранения массы в трубопроводе вычисляется по формуле (1):

$$\dot{M} = \rho v S = \text{const} \quad (1)$$

Уравнение изменения количества движения газа (2):

$$\rho \cdot v \frac{dv}{dx} = -\frac{dp}{dx} - \frac{1}{d} \left(\frac{\lambda}{2} \cdot \rho v^2 \right) - \rho g \cdot \frac{dz}{dx}, \quad (2)$$

Уравнение изменения полной энергии газа в газопроводе (3):

$$v \frac{dv}{dx} + C_p \cdot \left[\frac{dT}{dx} - D_* \frac{dp}{dx} \right] = -\frac{\pi d K_T}{\rho S v} (T - T_{\text{нар}}) - g \frac{dz}{dx}, \quad (3)$$

Уравнение состояния реального газа (4):

$$p = Z(\bar{p}, \bar{T}) \rho R T, \quad (4)$$

Изобарная теплоемкость газа (5):

$$C_p(p, T) = C_v + ZR \cdot \frac{\left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right]^2}{1 - \frac{p}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial p}\right)_T}, \quad (5)$$

Коэффициент Джоуля-Томсона (6):

$$D_*(p, T) = \frac{1}{\rho C_p(p, T)} \cdot \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p. \quad (6)$$

Уравнения и соотношения (1) – (6) образуют систему уравнений (7) для расчёта стационарных режимов работы магистральных газопроводов [1].

$$\begin{cases} \rho v \frac{dv}{dx} + \frac{dp}{dx} = -\frac{1}{d} \left(\frac{\lambda}{2} \cdot \rho v^2\right) - \rho g \cdot \frac{dz}{dx}; \\ \frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{2} + J\right) = -\frac{\pi d K_T}{\dot{M}} (T - T_{\text{нар}}) - g \cdot \frac{dz}{dx}; \\ p = Z(\bar{p}, \bar{T}) \rho R T; \end{cases} \quad (7)$$

С помощью различных преобразований и введения различных соотношений получится система (8) обыкновенных дифференциальных уравнений для двух неизвестных функций – давления $p(x)$ и температуры $T(x)$.

$$\begin{cases} a_1(p, T) \frac{dp}{dx} + b_1(p, T) \frac{dT}{dx} = c_1(p, T, x) \\ a_2(p, T) \frac{dp}{dx} + b_2(p, T) \frac{dT}{dx} = c_2(p, T) \end{cases} \quad (8)$$

Соотношения из системы уравнений (8) в (9) и в (10) являются функциями от давления и от температуры, а также и от координаты газопровода.

$$\begin{aligned} a_1(p, T) &= \frac{1}{(\dot{M}/S)^2} - \frac{ZRT}{p^2} \cdot \left[1 - \frac{p}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial p}\right)_T\right]; \\ b_1(p, T) &= \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{\rho}\right)_p = \frac{ZR}{p} \cdot \left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right]; \\ c_1(p, T, x) &= -\frac{1}{(\dot{M}/S)^2} \cdot \left[\frac{\lambda}{2d} \cdot \frac{(\dot{M}/S)^2}{\rho} + \rho g \frac{dz}{dx}\right] + \frac{1}{\rho S} \cdot \frac{dS}{dx}; \\ a_2(p, T) &= \left(\frac{\partial J}{\partial p}\right)_T - \frac{1}{\rho} = -\frac{ZRT}{p} \left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$b_2(p, T) = \left(\frac{\partial J}{\partial T} \right)_p = C_p(p, T) = C_V + \frac{ZR \left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \right]^2}{\left[1 - \frac{p}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_T \right]}; \quad (10)$$

$$c_2(p, T) = -\frac{4K_T/d}{(\dot{M}/S)} (T - T_{\text{нар}}) + \frac{\lambda}{2d} \cdot \frac{(\dot{M}/S)^2}{\rho^2},$$

Также система (8) представляет собой систему двух линейных уравнений относительно производных dp/dx и dT/dx . Она решается относительно указанных производных, используя для этого правило Крамера. Решение системы представлено в (11).

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = \frac{\Delta_1}{\Delta} \\ \frac{dT}{dx} = \frac{\Delta_2}{\Delta} \end{cases} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta &= a_1 b_2 - a_2 b_1 \neq 0 \\ \Delta_1 &= c_1 b_2 - c_2 b_1 \\ \Delta_2 &= a_1 c_2 - a_2 c_1 \end{aligned} \quad (12)$$

Систему дифференциальных уравнений (8) можно интегрировать любым из стандартных методов, например численным методом Рунге-Кутты или более простым методом ломанных Эйлера, который был использован в работе.

Важно отметить, что алгоритм, описанный выше, является только лишь расчетом одной точки газопровода. Для полного расчета газопровода данные действия нужно проделать множество раз. Здесь становится актуальным применение вычислительной техники и компьютерных программ.

Применим рассмотренный метод к реальному высокогорному газопроводу «Дзуарикау-Цхинвал». На рис.1а изображен профиль трассы высокогорного газопровода «Дзуарикау-Цхинвал». Рис.1б отображает информацию о распределении массового расхода по длине газопровода за счет потребления газа на ГРС (газораспределительных станциях). На рис.2а и рис.2б изображены результаты численного метода расчета в качестве графиков распределения температуры и давления соответственно.

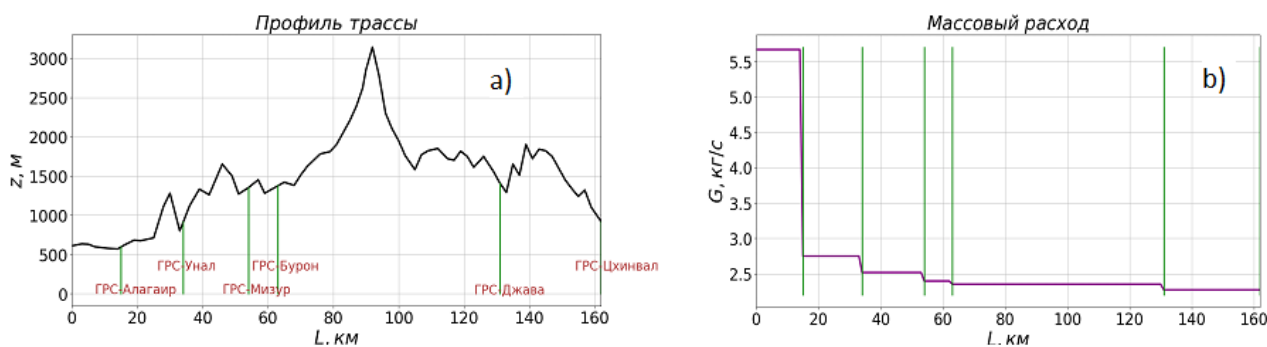


Рис.1. Профиль трассы (а) и график распределения массового расхода (b) по длине газопровода «Дзуарикау-Цхинвал» [2]

Из рис.2а и рис.2б видно, что на трассе газопровода изменения давления и температуры в основном зависят от перепадов высоты. На 15 км-е газ подогревается до 285K на узле очистки газа. Минимальные значения температуры ($T_{\min}=276$ K) и давления ($P_{\min}=4,33$ МПа) наблюдаются на 92 километре трассы при максимальной высоте 3140 метров. Таким образом, при резких увеличениях высоты давление и температура снижаются, а при уменьшении – возрастают.

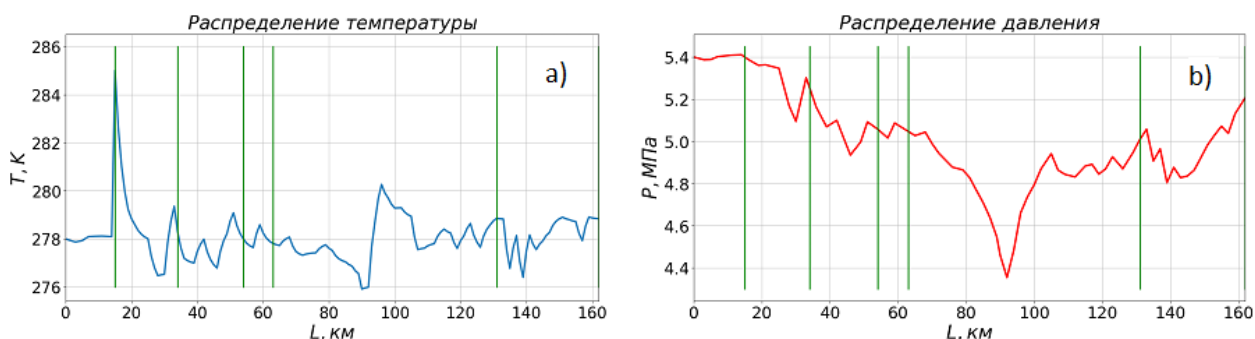


Рис.2. График распределения температуры (а) и давления (b) газа по длине газопровода

Закключение. В данной работе была выполнена оптимизация расчетов с выводами о влиянии профиля на транспорт газа для высокогорного газопровода «Дзуарикау-Цхинвал», на основе использования численного метода.

Литература

1. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: Учеб. пособие М.: Изд. центр РГУНГ им. И.М.Губкина, 2012. — 456 с;
2. Проектная документация газопровода «Дзуарикау-Цхинвал». ЮЖНИИГИПРОГАЗ, Ростов-на-Дону, 2006г.