МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСПОРТА ПРИРОДНОГО ГАЗА ПО МНОГОНИТОЧНОМУ МАГИСТРАЛЬНОМУ ГАЗОПРОВОДУ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ РАБОТЫ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

Гусарова И.Г., Каминская А.В.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина, 14, каф. прикладной математики, тел. (057) 702-14-36

The purpose of work is a mathematical design of the unstationary unisothermal modes of transport of natural gas in line sections of main gas pipelines taking into account the dynamics of work of constipation armature (valves, bolts, etc.) with a change speed of opening/closing of valves and evaluation of influencing of speed of blocking valves on distributing of parameters of gas stream on length of line sections of main gas pipelines in time.

Магистральный газопровод (МГ) является основным и наиболее сложным объектом газотранспортной системы. Основными элементами, которого являются линейные участки (ЛУ) – участки трубопровода большого диаметра. На расстоянии 20-30 км на участках трубопровода устанавливается запорная арматура, с помощью которой может быть перекрыт участок газопровода в случае аварии или с целью проведения ремонтных работ на МГ. При этом отключение участка трубопровода должно проводиться оперативно (в первую очередь это касается аварийных ситуаций) и не должно влиять на подачу природного газа потребителям с заданными параметрами. Следовательно, для прогнозирования параметров газового потока (давление, температура и расход природного газа) в линейных участках магистральных газопроводов с целью безопасной эксплуатации МГ актуальной задачей является разработка информационно-аналитической системы по расчету режимов транспорта природного газа в ЛУ МГ, которые в силу неравномерности потребления газа и аварийных ситуаций являются нестационарными и неизотермическими, на основе достоверных и точных математических моделей элементов МГ (участки трубопровода и краны) и методов их решения.

Целью работы является математическое моделирование нестационарных неизотермических режимов транспорта природного газа (ННРТГ) в ЛУ магистральных газопроводах с учетом динамики работы запорной арматуры (краны, задвижки, вентили и т.п.) с изменением скорости открытия/закрытия крана и оценивание влияния скорости перекрытия кранов на распределение параметров газового потока по длине линейных участков МГ с течением времени. Условно все виды запорной арматуры будем называть кранами.

К основным задачам исследования в данной работе необходимо отнести, во-первых, разработку алгоритма расчета ННРТГ в МГ с использованием модели крана, учитывающей скорость перекрытия кранов и включение данного алгоритма в разрабатываемую информационно-аналитическую систему расчета нестационарных неизотермических режимов транспорта газа в ЛУ МГ, а во-вторых, проведение численного анализа результатов моделирования информационно-аналитической системы.

Математическая модель (ММ) ННРТГ в МГ состоит из ММ участков трубопровода (УТ) и ММ линейных кранов. Математическая модель ННРТГ по участкам трубопровода описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнения неразрывности (или закона сохранения массы), закона сохранения количества движения и закона сохранения энергии:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + (1 - \alpha ST \frac{W^2}{P^2}) \frac{\partial P}{\partial x} + 2\alpha ST \frac{W}{P} \frac{\partial W}{\partial x} + \beta ST \frac{W|W|}{P} + \frac{g}{\alpha S} \frac{P}{T} \frac{dh}{dx} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \alpha ST \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\alpha S\gamma}{T-\gamma D_j P}\cdot\frac{T^2 W}{P}\cdot\frac{\partial T}{\partial x}+\alpha S\cdot\left(\frac{T\gamma}{T-\gamma D_j P}-1\right)\cdot\frac{T^2}{P}\cdot\frac{\partial W}{\partial x}-\frac{\alpha S\gamma D_j}{T-\gamma D_j P}\cdot\frac{T^2 W}{P}\cdot\frac{\partial P}{\partial x}+$$

$$+\frac{4K}{D}\cdot\frac{(\gamma-1)}{T-\gamma D_j P}\cdot\frac{T^2}{P}\cdot(T-T_{rp})+\frac{g(\gamma-1)}{T-\gamma D_j P}\cdot\frac{WT^2}{P}\frac{dh}{dx}=0 \qquad (3)$$

где $\alpha=\frac{zgR}{S}$, $\beta=\frac{\lambda\alpha}{2D}$, $\gamma=\frac{C_p}{C_p-zgR}$, $W(x,t), T(x,t), P(x,t)$ – удельный массовый расход, температура, давление газа, t, x – временная и пространственная координата, λ – коэффициент гидравлического сопротивления, D – диаметр трубы, K – коэффициент теплопередачи от трубы к грунт, T_{rp} – температура грунта, h – глубина залегания трубы, g – ускорение свободного падения, S – площадь поперечного сечения трубы, C_p – удельная теплоемкость газа, z – коэффициент сжимаемости газа, D_j – коэффициент Джоуля-Томпсона.

Система уравнений (1)-(3) учитывает эффект дросселирования, характеризуемый коэффициентом Джоуля-Томпсона.

Математическая модель линейного крана при переводе всех единиц параметров режимов транспорта газа (РТГ) в систему единиц СИ, описывающая РТГ через f-й кран ($f=\overline{1,r}$), будет иметь следующий вид:

$$P_K^f=P_H^f-\zeta\cdot\frac{Rg}{2(F_{вых}^f)^2}\cdot\frac{T_K^f z_K^f}{P_K^f}\cdot(G_H^f)^2,$$

$$T_K^f=T_H^f-D_j(P_H^f-P_K^f),$$

где P_H^f, P_K^f – давление на входе и выходе f-го крана соответственно, ζ – коэффициент местного гидравлического сопротивления, z_K^f – коэффициент сжимаемости, G_H^f – массовый расход газа на входе f-го крана, $F_{вых}^f$ – площадь сечения трубы за краном, T_H^f, T_K^f – температура на входе и выходе крана.

Уравнения математической модели дополняются условиями согласования параметров газового потока для всех промежуточных узлов МГ.

Условия согласования параметров газового потока для m-го промежуточного узла со степенью инциденций 2 и выше принимают для расходов, давлений и температур соответственно следующий вид:

$$\sum_{j\in V_m^+}G_j(x^{++},t)=\sum_{i\in V_m^-}G_i(x^+,t), m\in V_2,$$

$$P_j(x^{++},t)=P_i(x^+,t), j\in V_m^+, i\in V_m^-,$$

$$\sum_{j\in V_m^+}((G_j(x^{++},t))^+\cdot T_j(x^{++},t))+\sum_{i\in V_m^-}((G_i(x^+,t))^-\cdot T_i(x^+,t))=T_{cp}^m\cdot(\sum_{j\in V_m^+}((G_j(x^{++},t))^+ +\sum_{i\in V_m^-}(G_i(x^+,t))^-),$$

кроме того, если $G_j(x^{++},t)<0$, то $T_j^m(x^{++},t)=T_{cp}^m(t)$, $j\in V_m^+$,

если $G_i(x^+,t)>0$, то $T_i^m(x^+,t)=T_{cp}^m(t)$, $i\in V_m^-$,

где $(a)^+=\begin{cases}a, a\ge 0,\\ 0, a<0\end{cases}$ $(a)^-=\begin{cases}-a, a<0,\\ 0, a\ge 0\end{cases}$ x^+, x^{++} – начальная и конечная координата соответствующего участка; V – множество узлов, V_m^+, V_m^- – множество индексов дуг,

входящих и выходящих из m-го узла, $G(x,t), T(x,t), P(x,t)$ – массовый расход, давление и температура для УТ, $T_{cp}^{m}(t)$ – средняя температура вытекающего из m-го узла газа.

Условия согласования для f-го кранового узла, $f \in V_1$, где V_1 - множество входов в f-й кран, имеют следующий вид: $P(x^{++},t) = P_H^f(t)$, $W(x^{++},t)\cdot S = G_{KP}^f(t)$, $T(x^{++},t) = T_{KP}^f(t)$, где x^{++} – конечная координата соответствующего участка, прилегающего к входу f-го крана, S – площадь поперечного сечения трубы соответствующего участка, прилегающего к входу S-го крана, $W(x,t)$, $P(x,t)$, $T(x,t)$ – удельный массовый расход, давление и температура газа участка, прилегающего к входу f-го крана, $G_{KP}^f(t)$ - массовый расход газа через f-й кран.

Условия согласования для f-го кранового узла, $f \in V_2$, где V_2 - множество выходов из f-го крана, имеют следующий вид: $P(x^{+},t) = P_K^f(t)$, $W(x^{+},t)\cdot S = G_{KP}^f(t)$, $T(x^{+},t) = T_{KP}^f(t)$, где x^{+} – начальная координата соответствующего участка, прилегающего к выходу f-го крана, S – площадь поперечного сечения трубы соответствующего участка, прилегающего к выходу f-го крана, $W(x,t)$, $P(x,t)$, $T(x,t)$ – удельный массовый расход, давление и температура газа участка, прилегающего к выходу f-го крана.

Для того чтобы системы уравнений общей математической модели была разрешимой необходимо задать на входах и выходах МГ граничные условия 1-го и 2-го типов. Для узлов 1-го типа задано давление, как функция времени, для узлов 2-го типа задан расход, как функция времени. Задается начальное распределение расходов, давлений и температур для участков трубопровода.

Предлагается численный метод и алгоритм решения расчета систем уравнений, объединенных ММ УТ и кранов, связанных УС параметров газовых потоков. Решение СУ ищется с применением метода конечных разностей. Аппроксимация уравнений системы на УТ проводится разностными уравнениями при помощи неявной конечно-разностной схемы. После замены частных производных для УТ получаем дискретный аналог системы уравнений (СУ) общей ММ ННРТРГ - систему нелинейных алгебраических уравнений. Эту систему линеаризуем методом Ньютона. Полученная линейная СУ решается относительно векторов поправок к неизвестным методом Гаусса с выбором главного элемента. Метод позволяет существенно сократить размерность линейной системы путем специальных преобразований, предложенных авторами работы. То есть, часть переменных с помощью УС исключается из системы линейных уравнений. Далее решается преобразованная система линейных уравнений и находятся исключенные переменные.

Разработанный метод был протестирован на тестовых примерах. Рассмотрим конкретный пример использования разработанного метода. Расчет проводился по расчетной схеме изображенной на рис.1.

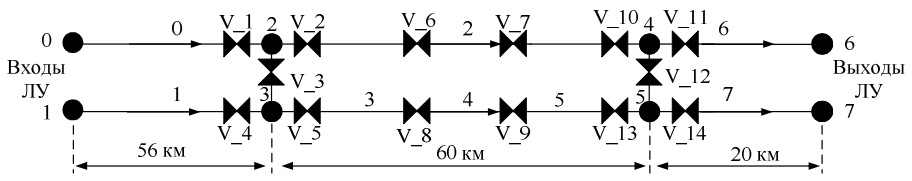

Рис.1. – Расчетная схема ЛУ МГ

В качестве начального условия принимаем стационарное течение газа с давлением $P = 84.636$ атм., температурой $T = 40^0$C и суммарным расходом природного газа равным 120 млн.м^3/ сут. на входах в ЛУ МГ. Внутренние диаметры труб – 1400 мм, толщина стенок – 10 мм, шероховатость труб – 0,03мм, удельная теплоемкость газа Ср = 0.655952 ккал/(кг·^{0}С), относительная плотность газа по воздуху Δ=0,604707, температура грунта

на глубине заложения газопровода tгр=10°С, коэффициент теплопередачи от газа к грунту K = 1,4 ккал/ ($м^2 \cdot ч \cdot {}^0С$). Краны $V_1 - V_7, V_10 - V_14$ полностью открыты. Краны V_8 и V_9 закрывались в течение 2 минут через 3 мин. и 6 мин. после начала расчета соответственно. Граничные условия представлены в таблице 1. Расчет проводился в течение 480 мин. с шагом разностной сетки по времени 0,4 мин. и шагом по пространству равным 10 км. В результате расчета получаем распределение параметров газового потока по рассматриваемому ЛУ МГ. В частности, графики распределения давления, температуры и расхода газа от времени по участку 7, прилегающему к крановой площадке, на которой был закрыт кран V_9, представлены на рис. 2-4.

Таблица 1

Узлы сети	Значения в узлах сети	Узлы сети	Значения в узлах сети
0	$P(t) = 8{,}4$ МПа, $T(t) = 40^0$ С	6	$q^6(t) = 60$ млн.$м^3$ в сут., $t \geq 0$ мин.
1	$P(t) = 8{,}4$ МПа, $T(t) = 40^0$ С	7	$q^7(t) = 60$ млн.$м^3$ в сут., $t \geq 0$ мин.

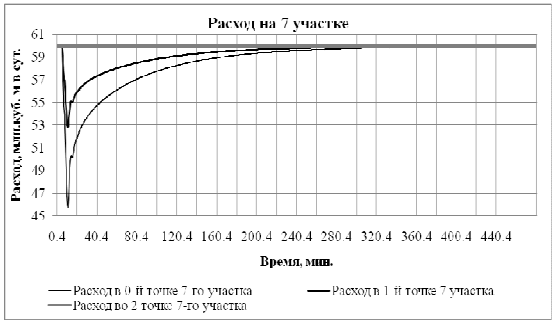

Рис. 2. – График зависимости расхода от времени в узлах ЛУ МГ

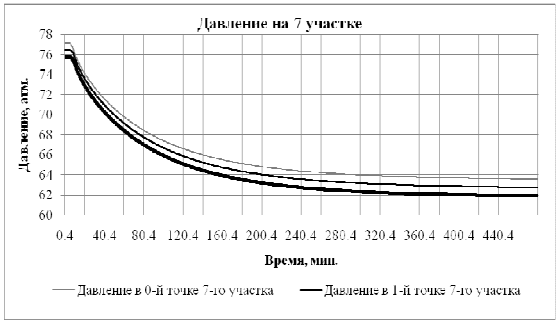

Рис. 3. – График зависимости давления от времени в узлах ЛУ МГ

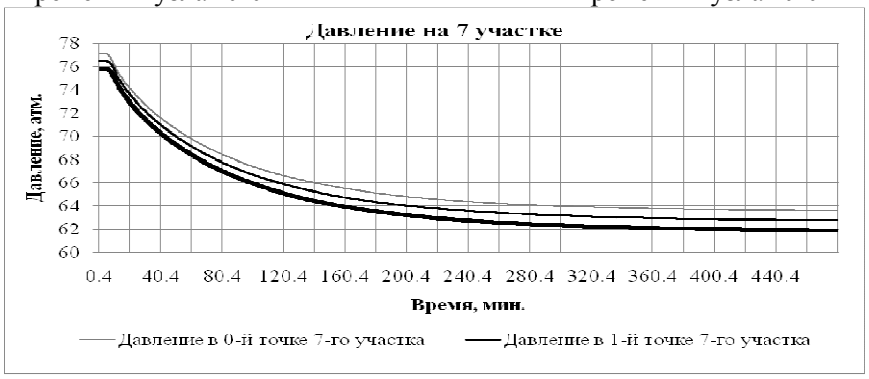

Рис. 4. – График зависимости температуры от времени в узлах ЛУ МГ

Таким образом, тестирование информационно-аналитической системы на основе предложенного алгоритма расчета ННРТГ с учетом динамики работы запорной арматуры, позволяет достоверно и точно рассчитывать параметры газового потока по длине ЛУ МГ. Расчеты показали, что при моделировании закрытия/открытия крана с заданной скоростью закрытия/открытия влияние крана на прилегающие к нему трубопроводы описывается корректно.

Список литературы:

1. Тевяшев А.Д., Гусарова И.Г., Чуркина А.В. Эффективный метод и алгоритм расчета нестационарных неизотермических режимов транспорта газа в газотранспортной сети произвольной структуры. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – 2/3 (20). – С. 45-52.

2. Сарданашвили С.А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа).- М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005,-577 с.