УДК 004.942:621.6:622.691

А.Д. ТЕВЯШЕВ, И.Г. ГУСАРОВА, А.В. КАМИНСКАЯ

УЧЕТ ДИНАМИКИ РАБОТЫ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСПОРТА ГАЗА В МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

Рассматривается математическая модель и метод расчета нестационарных неизотермических режимов транспорта природного газа, учитывающие модель течения газа через запорную арматуру и позволяющие рассчитывать параметры газовых потоков в линейных участках магистральных газопроводов с учетом динамики работы запорной арматуры.

1. Введение

Многониточные магистральные газопроводы (ММГ) являются наиболее сложными объектами газотранспортной системы, при моделировании режимов транспорта газа по ММГ необходимо учитывать все особенности транспортирования газа под высоким давлением на большие расстояния. Через определенные интервалы на ММГ установлены компрессорные станции, поддерживающие давление в газопроводе, и краны, необходимые для локализации в случае аварии участка трубопровода или отключения участков трубопроводов при проведении на них ремонтно-профилактических работ. При этом технологическое оборудование на ММГ, а именно: запорные и регулирующие устройства, сужающие сечение трубы – может оказывать влияние на режимы транспорта газа, которые в силу различных причин являются нестационарными и неизотермическими. Это влияние заключается в гидравлической потере давления на так называемых местных гидравлических сопротивлениях: вентилях, кранах, задвижках, диафрагмах, всевозможных закруглениях, сужениях, расширениях и т.д., т.е. всюду, где поток претерпевает деформацию, которые в отдельных случаях могут значительно влиять на изменение параметров газового потока (давление, расход газа и температуру) при расчетах реальных процессов течения природного газа. Поэтому актуальной задачей является необходимость учитывать эти потери при моделировании нестационарных неизотермических режимов транспорта газа (ННРТГ) по линейным участкам (ЛУ) ММГ через запорную арматуру.

В связи с этим *целью* данного исследования является разработка метода решения системы дифференциальных уравнений математической модели (ММ) ННРТГ в ЛУ ММГ, включающей ММ запорной арматуры, в целях учета динамики ее работы.

Решаются следующие *задачи:* выбор ММ запорной арматуры и разработка метода расчета ННРТГ в ЛУ ММГ, математическая модель которых включает в себя ММ участков трубопроводов (УТ) и запорной арматуры.

2. Структура и математическая модель ЛУ ММГ

Математической моделью структуры ЛУ ММГ является ориентированный граф G(V, M), где V – множество узлов графа, M – множество дуг графа. Узлы графа представляют собой места соединения технологических элементов между собой. Множество дуг $M = M_1 \cup M_2$, где M_1 – множество дуг графа, соответствующих УТ, M_2 – множество дуг графа, соответствующих кранам. Множество узлов $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup V_5$, где V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 – множество входов ММГ, множество промежуточных узлов, множество выходов ММГ, множество входов и выходов в f-й кран, $f = \overline{1,\theta}$, $f \in M_2$ соответственно, $|V| = v$, $|V_1| = v_1$, $|V_2| = v_2$, $|V_3| = v_3$, $|V_4| = |V_5| = \theta$.

В качестве математической модели ННРТГ по участку трубопровода, представляющему собой цилиндрическую трубу постоянного диаметра, взята система дифференциальных уравнений в частных производных, учитывающая дроссель-эффект (индекс УТ для удобства опущен) [1, 2]:

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

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \alpha S\gamma T\frac{W}{P}\frac{\partial T}{\partial x} + \alpha S(\gamma-1)\frac{T^2}{P}\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{4K}{D}(\gamma-1)\frac{T}{P}\left(T - T_{гр}\right) + g(\gamma-1)\frac{WT}{P}\frac{dh}{dx} = 0, \tag{3}$$

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

Систему уравнений (1)–(3) для j-го УТ (индекс УТ опущен) запишем в матричной форме:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + B\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \Phi, \tag{4}$$

где

$$B = \begin{bmatrix} 2\alpha TS\frac{W}{P} & 1 - \alpha TS\frac{W^2}{P^2} & 0 \\ \alpha TS & 0 & 0 \\ \alpha(\gamma-1)S\frac{T^2}{P} & 0 & \alpha\gamma TS\frac{W}{P} \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} -\beta TS\frac{W|W|}{P} - \frac{g}{\alpha S}\frac{P}{T}\frac{dh}{dx} \\ 0 \\ -\frac{4K}{D}(\gamma-1)\frac{T}{P}\left(T - T_{гр}\right) - \frac{g}{S}(\gamma-1)\frac{TW}{P}\frac{dh}{dx} \end{bmatrix}, \varphi = (W, P, T).$$

Условно все виды запорной арматуры (задвижки, клапаны и краны) будем называть кранами. В качестве ММ линейного крана при переводе всех единиц параметров в систему единиц СИ предлагается выбрать модель, представляющую собой уравнения сохранения энергии и местных потерь давления, которые описывают режимы транспорта газа (РТГ) через f-й кран ($f = \overline{1,\theta}$). Модель имеет следующий вид [3]:

$$P_K^f = P_H^f - \zeta \frac{Rg}{2(F_{вых}^f)^2} \frac{T_K^f z_K^f}{P_K^f}(G_H^f)^2, \tag{5}$$

$$T_K^f = T_H^f - D_j(P_H^f - P_K^f), \tag{6}$$

где P_H^f, P_K^f — давление на входе и выходе f-го крана соответственно; ζ – коэффициент местного гидравлического сопротивления; D_j – коэффициент Джоуля-Томсона; 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 f-го крана.

Уравнение (5) описывает местную потерю давления. Поскольку кран можно рассматривать как местное сопротивление, то наибольшее влияние на температуру оказывает эффект Джоуля-Томпсона, т.е. изменение температуры газа при адиабатическом дросселировании — медленном протекании газа под действием постоянного перепада давлений сквозь дроссель, местное препятствие газовому потоку. Учитывая малую протяженность сечения крана, используем расчетную формулу (6).

Для m-го промежуточного узла условия согласования параметров газового потока (для массового расхода, давления и температуры соответственно) принимают следующий вид:

$$\sum_{j \in V_m^+} G_j(x^{++}, t) = \sum_{i \in V_m^-} G_i(x^+, t), m \in V_2, \tag{7}$$

$$P_j(x^{++}, t) = P_i(x^+, t), j \in V_m^+, i \in V_m^-, \tag{8}$$

$$\sum_{j \in V_m^+} ((G_j(x^{++}, t))^+ \cdot T_j(x^{++}, t)) + \sum_{i \in V_m^-} ((G_i(x^+, t))^- \cdot T_i(x^+, t)) = T_{cp}^m \cdot (\sum_{j \in V_m^+} ((G_j(x^{++}, t))^+ + \sum_{i \in V_m^-} (G_i(x^+, t))^-), \tag{9}$$

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 сети; V_m^+, V_m^- – множество индексов дуг, входящих и выходящих из m-го узла сети; $G(x,t), T(x,t), P(x,t)$ – массовый расход ($кг/с$), давление (Па) и температура (К) для j-го участка; $T_{cp}^m(t)$ – средняя температура вытекающего из m-го узла газа (К).

Структура модели крана представлена в виде двухполюсника, имеющего один вход и один выход. Условия согласования в f-м узле ($f \in V_3$), являющемся входом f-го крана, ($f = \overline{1, \theta}$) имеют следующий вид: $P(x^{++}, t) = P_H^f(t)$, $W(x^{++}, t)S = G_{KP}^f(t)$, $T(x^{++}, t) = T_H^f(t)$, где x^{++} – конечная координата соответствующего участка, прилегающего к входу f-го крана; S – площадь поперечного сечения трубы соответствующего участка, прилегающего к входу f-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 в f-м узле, ($f \in V_4$), являющемся выходом f-го крана, ($f = \overline{1, \theta}$) имеют следующий вид: $P(x^+, t) = P_K^f(t)$, $W(x^+, t)S = G_{KP}^f(t)$, $T(x^+, t) = T_K^f(t)$, 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.

Таким образом, общая математическая модель ННРТГ в ЛУ ММГ представляет собой взаимосвязанные системы дифференциальных уравнений в частных производных, соответствующих каждому УТ, и системы нелинейных алгебраических уравнений, соответствующих каждому крану, которые связаны между собой системой линейных алгебраических уравнений, соответствующих условиям согласования параметров газового потока в узлах графа.

Для того чтобы система уравнений (4) была разрешимой, необходимо задать граничные условия для узлов, соответствующих входам и выходам ЛУ ММГ. Граничные узлы 1-го типа – это узлы, для которых задано давление, как функция времени, и 2-го типа - задан расход, как функция времени.

Граничные условия для m-го выходного и входного узлов имеют вид:

$$G_v^m(t) = G^m(t) \text{ (узел 2-го типа) или } P_{уз}^m(t) = P^m(t) \text{ (узел 1-го типа),}$$

кроме того, на входах задана температура поступающего газа $T_v^m(t) = T^m(t)$.

Задается также начальное распределение расходов, давлений и температур для ЛУ: $W_j(x_j,\ 0) = W_j^0(x_j)$, $P_j(x_j,\ 0) = P_j^0(x_j)$, $T_j(x_j,\ 0) = T_j^0(x_j)$, где $x_j \in [x_j^+, x_j^{++}], \forall j \in M$.

3. Метод решения системы уравнений математической модели ЛУ ММГ

Для получения численного решения система (4) аппроксимируется разностными уравнениями с использованием неявной конечно-разностной схемы, определенной на пятиточечном шаблоне (с разностными операторами второго порядка аппроксимации по пространственной и временной переменным) (рис. 1) [1].

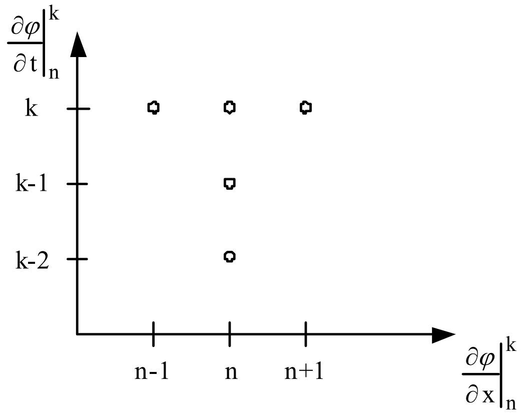

Рис. 1. Пятиточечный шаблон

Устанавливаем равномерную сетку с постоянными шагами по пространственной и временной переменным и систему дифференциальных уравнений аппроксимируем следующими соотношениями [1]:

$$\left.\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right|_n^k = \frac{3\varphi_n^k - 4\varphi_n^{k-1} + \varphi_n^{k-2}}{2\Delta t}, n = \overline{0, N}, \tag{10}$$

$$\left.\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right|_n^k = \begin{cases} \dfrac{\varphi_1^k - \varphi_0^k}{\Delta x}, & n = 0, \\ \dfrac{\varphi_{n+1}^k - \varphi_{n-1}^k}{2\Delta x}, & n = \overline{1, N-1}, \\ \dfrac{\varphi_N^k - \varphi_{N-1}^k}{\Delta x}, & n = N. \end{cases} \tag{11}$$

С учетом (10) – (11) система уравнений для j-го участка трубопровода принимает вид:

$$\frac{3}{2\Delta t}\varphi_0^k - \frac{1}{\Delta x}B_0^k\,\varphi_0^k + \frac{1}{\Delta x}B_0^k\,\varphi_1^k = \Phi_0^k + \frac{2}{\Delta t}\varphi_0^{k-1} - \frac{1}{2\Delta t}\varphi_0^{k-2}, \tag{12}$$

$$-\frac{1}{2\Delta x}B_n^k\varphi_{n-1}^k+\frac{3}{2\Delta t}\varphi_n^k+\frac{1}{2\Delta x}B_n^k\varphi_{n+1}^k=\Phi_n^k+\frac{2}{\Delta t}\varphi_n^{k-1}-\frac{1}{2\Delta t}\varphi_n^{k-2},n=\overline{1,N_j-1}, \tag{13}$$

$$\frac{3}{2\Delta t}\varphi_{N_j}^k+\frac{1}{\Delta x}B_{N_j}^k\varphi_{N_j}^k-\frac{1}{\Delta x}B_{N_j}^k\varphi_{N_j-1}^k=\Phi_{N_j}^k-\frac{2}{\Delta t}\varphi_{N_j}^{k-1}-\frac{1}{2\Delta t}\varphi_{N_j}^{k-2}. \tag{14}$$

Таким образом, получили систему нелинейных алгебраических уравнений, которая содержит 3(N+1) уравнение и 3(N+1) переменных. Данная система линеаризуется методом Ньютона.

Полученная линейная система для k-го временного слоя, r-й итерации и j-го УТ записывается в итерационном виде:

$$\begin{gathered}\left[\frac{\partial\psi}{\partial\varphi}\right]_0^{k,r,j-1}\delta\varphi_0^{k,r,j}+\frac{1}{\Delta}B_0^{k,r,j-1}\delta\varphi_1^{k,r,j}=\psi_0^{k,r,j-1},\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\ -\frac{1}{2\Delta}B_n^{k,r,j-1}\delta\varphi_{n-1}^{k,r,j}+\left[\frac{\partial\psi}{\partial\varphi}\right]_n^{k,r,j-1}\delta\varphi_n^{k,r,j}+\frac{1}{2\Delta}B_n^{k,r,j-1}\delta\varphi_{n+1}^{k,r,j}=\psi_n^{k,r,j-1},n=\overline{1,\ N_j-1}\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\ \left[\frac{\partial\psi}{\partial\varphi}\right]_{N_j}^{k,r,j-1}\delta\varphi_{N_j}^{k,r,j}+\frac{1}{\Delta}B_{N_j}^{k,r,j-1}\delta\varphi_{N_j-1}^{k,r,j}=\psi_{N_j}^{k,r,j-1},\end{gathered} \tag{15}$$

где $\delta\varphi_0^{k,r,j},\ldots,\delta\varphi_{N_j}^{k,r,j}$ – векторы поправок к неизвестным; $\psi_0^{k,r,j-1},\ldots,\psi_{N_j}^{k,r,j-1}$ – векторы невязок в соответствующих точках пространства; $\left[\frac{\partial\psi}{\partial\varphi}\right]_0^{k,r,j-1},\ldots,\left[\frac{\partial\psi}{\partial\varphi}\right]_{N_j}^{k,r,j-1}$ – матрицы Якоби в соответствующих точках пространства.

Для решения системы линейных алгебраических уравнений (15) необходимо вычислить векторы невязок для каждого j-го участка трубопровода [2]:

$$\psi_0^{k,r,j}=\frac{3}{2\Delta t}\varphi_0^{k,r,j}-\frac{1}{\Delta x}B_0^{k,r,j}\varphi_0^{k,r,j}+\frac{1}{\Delta x}B_0^{k,r,j}\varphi_1^{k,r,j}-\Phi_0^{k,r,j}-\frac{2}{\Delta t}\varphi_0^{k-1,j}+\frac{1}{2\Delta t}\varphi_0^{k-2,j},$$

$$\psi_n^{k,r,j}=-\frac{1}{2\Delta x}B_n^{k,r,j}\varphi_{n-1}^{k,r,j}+\frac{3}{2\Delta t}\varphi_n^{k,r,j}+\frac{1}{2\Delta x}B_n^{k,r,j}\varphi_{n+1}^{k,r,j}-\Phi_n^{k,r,j}-\frac{2}{\Delta t}\varphi_n^{k-1,j}+\frac{1}{2\Delta t}\varphi_n^{k-2,j},n=\overline{1,N_j-1},$$

$$\psi_{N_j}^{k,r,j}=\frac{3}{2\Delta t}\varphi_{N_j}^{k,r,j}+\frac{1}{\Delta x}B_{N_j}^{k,r,j}\varphi_{N_j}^{k,r,j}-\frac{1}{\Delta x}B_{N_j}^{k,r,j}\varphi_{N_j-1}^{k,r,j}-\Phi_{N_j}^{k,r,j}-\frac{2}{\Delta t}\varphi_{N_j}^{k-1,j}+\frac{1}{2\Delta t}\varphi_{N_j}^{k-2,j}.$$

По невязкам вычисляются элементы матрицы Якоби $\left[\frac{\partial\psi}{\partial\varphi}\right]_0^{k,r,\ j}$ в начальной точке 0, $\left[\frac{\partial\psi}{\partial\varphi}\right]_n^{k,r,\ j}$ во внутренних точках ($n=\overline{1,N_j-1}$) и $\left[\frac{\partial\psi}{\partial\varphi}\right]_{N_j}^{k,r,\ j}$ в конечной точке N_j [2].

В итоге полученную линейную систему уравнений (15) упрощаем при помощи условий согласования. Условия согласования (7)-(8) линеаризуем:

$$\sum_{j\in V_m^+}S_j\delta W_{N_j}^{k,r,j}=\sum_{i\in V_m^-}S_i\delta W_i^{k,r,i},m\in V_2, \tag{16}$$

$$\delta P_{N_j}^{k,r,j}=\delta P_i^{k,r,i},j\in V_m^+,i\in V_m^-. \tag{17}$$

В соответствии с предложенным методом из условия (16) необходимо выбрать переменную по удельному массовому расходу $\delta W_{N_{j0}}^{k,r,j0}$, равную

$$\delta W_{N_{j0}}^{k,r,j0} = \frac{\sum\limits_{i \in V_m^-} S_i \delta W_i^{k,r,i}}{S_{j0} \sum\limits_{\substack{j \in V_m^+ \\ j \neq j0}} S_j \delta W_{N_j}^{k,r,j}}, m \in V_2,$$

и исключить ее из системы уравнений. При этом для промежуточных узлов уравнение, в котором находилась исключенная переменная по удельному массовому расходу, складываем с уравнением с подобной переменной по удельному массовому расходу. Из условия (17) для промежуточных узлов графа ММГ необходимо оставить переменную $\delta P_{j_0}^{k,r,j0}, j_0 \neq j_f$, а все остальные переменные из системы уравнений исключить, кроме переменных, относящихся к участкам трубопровода, на которых находятся краны. При этом для промежуточных узлов уравнения, в которых находились исключенные переменные по давлению, складываем с уравнением с подобной переменной по давлению.

Совместный расчет режимов транспорта газа УТ через краны осуществляем следующим способом. Для всех узлов, являющихся выходами из кранов, соответствующие уравнения для определения невязок в 0 точке j-го участка по УТ заменяются уравнениями невязок модели крана (индекс крана для удобства опущен):

$$\psi_{0,2_{\text{кр}}}^{k,r,j} = P_H^{k,r,j} - P_K^{k,r,j} - \zeta \frac{Rg}{2(F_{\text{вых}}^{k,r,j})^2} \frac{T_K^{k,r,j} z_K^{k,r,j}}{P_K^{k,r,j}} (G_H^{k,r,j})^2,$$

$$\psi_{0,3_{\text{кр}}}^{k,r,j} = T_H^{k,r,j} - T_K^{k,r,j} - D_j (P_H^{k,r,j} - P_K^{k,r,j}),$$

Условия согласования для f-го крана линеаризуем:

$$\delta P_{N_j}^{k,r,j} = \delta P_H^f(t),\ \delta G_{KP}^f(t) = \delta W_{N_j}^{k,r,j} S_j,\ \delta T_{N_j}^{k,r,j} = \delta T_H^f(t),$$

$$\delta P_i^{k,r,i} = \delta P_K^f(t),\ \delta G_{KP}^f(t) = \delta W_i^{k,r,i} S_i,\ \delta T_i^{k,r,i} = \delta T_K^f(t).$$

Далее переменную по удельному массовому расходу, относящуюся ко входу или выходу из крана, также исключаем из системы уравнений следующим способом. Заменяем переменную $\delta W_{N_j}^{k,r,j}$ в системе уравнений в соответствии с условиями согласования для f-го крана по формуле: $\delta W_{N_j}^{k,r,j} = \frac{S_i}{S_j} \cdot \delta W_i^{k,r,i}$. При этом для узлов, являющихся входом и выходом из крана, уравнение, в котором находилась исключенная переменная по удельному массовому расходу, складываем с уравнением с подобной переменной по удельному массовому расходу.

После преобразований система уравнений решается относительно векторов поправок к неизвестным методом Гаусса с выбором главного элемента.

На каждом шаге итерационного процесса после нахождения параметров газового потока на каждом временном слое в соответствии с формулой (11) вычисляем среднюю температуру газа в узлах ММГ.

4. Пример

Рассмотрим пример расчета ННРТГ по ММГ через запорную арматуру с учетом динамики закрытия крана. Расчетная схема и граф рассматриваемого ММГ представлена на рис. 2 и 3 соответственно.

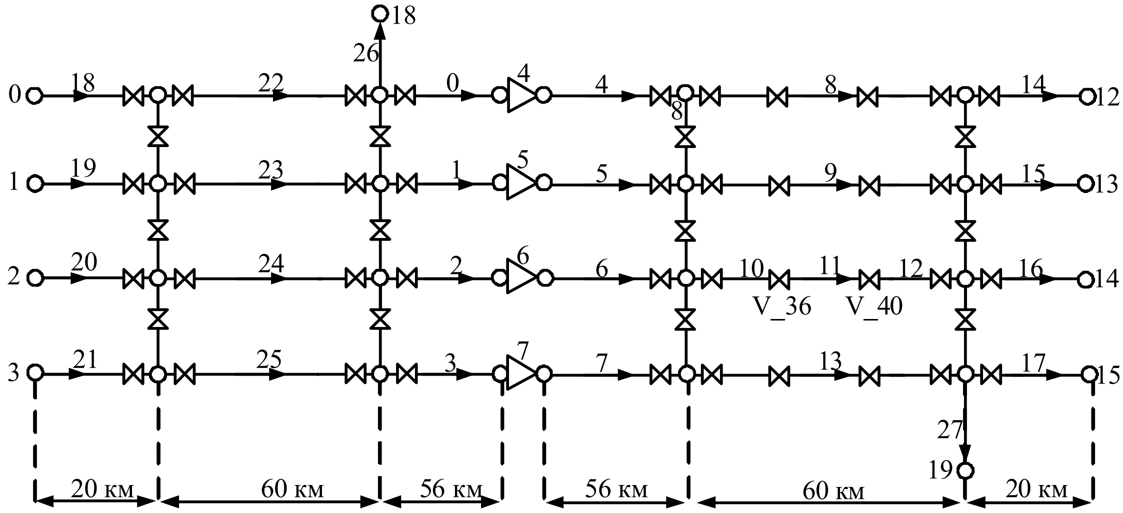

Рис. 2. Расчетная схема многониточного магистрального газопровода

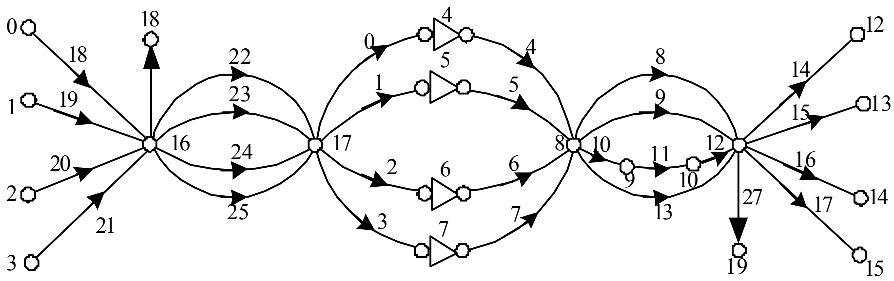

Рис. 3. Граф расчетной схемы многониточного магистрального газопровода

В качестве начального условия принимаем стационарное течение газа с давлением P=84,636 атм., температурой T=40 ^{0}C и суммарным коммерческим расходом природного газа, равным 265 млн.м^3/сут.

Таблица 1. Основные параметры, их обозначения и значения

Обозначение	Численная величина	Название параметра
Характеристики УТ		
D_i	1400	Внутренние диаметры труб, мм
h	10	Толщина стенок, мм
Cp	0,655952	Удельная теплоемкость, ккал/(кг·^{0} С)
K	1,4	Коэффициент теплопередачи от трубы к грунту, ккал/(м^2·ч·^{0} С)
Δ	0,604707	Относительная плотность газа по воздуху
$t_{гр}$	10	Температура грунта на глубине заложения газопровода, ^{0}С

В тестовом примере краны V_36 и V_40 линейно закрывались в течение 2-х минут через 30 и 45 мин. после начала расчета соответственно, а остальные предпологались полностью открытыми. График зависимости площади сечения крана при его закрытии от времени представлен на рис. 4. Граничные условия представлены в табл. 2. В узлах 4 – 7 расчетного графа располагались компрессорные цеха, моделирование которых проводилось по алгоритму, представленному в [2]. Расчет проводился в течение 24-х часов с шагом разностной сетки по времени 30 с и с шагом по пространству, равным 10 км. В результате расчета получаем распределение параметров газового потока по рассматриваемому ММГ. Промоделированный переходной процесс заканчивается по расходу и давлению за 1200 мин., а по температуре – за 24 часа.

Моделирование динамики закрытия крана происходило при помощи изменения площади сечения крана во времени (рис. 4).

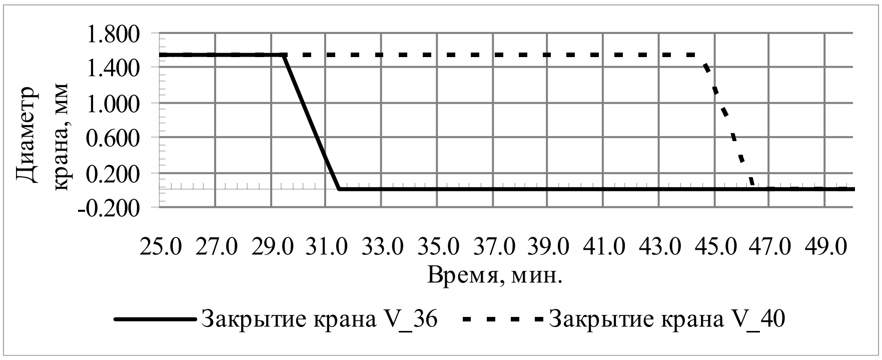

Рис. 4. График зависимости площади сечения крана при его закрытии от времени

Таблица 2. Граничные условия

Узлы сети	Значения в узлах сети	Узлы сети	Значения в узлах сети
0	$P(t) = 8{,}4\,МПа,\ T(t) = 40^0\ C$	13	$q^{13}(t) = 60 млн.м^3 в\ сут., t \geq 0 мин.$
1	$P(t) = 8{,}4\,МПа,\ T(t) = 40^0\ C$	14	$q^{14}(t) = 65 млн.м^3 в\ сут., t \geq 0\ мин.$
2	$P(t) = 8{,}4\,МПа,\ T(t) = 40^0\ C$	15	$q^{15}(t) = 60\ млн.м^3 в\ сут.,\ t \geq 0\ мин.$
3	$P(t) = 8{,}4\,МПа,\ T(t) = 40^0\ C$	18	$q^{18}(t) = 15 млн.м^3 в\ сут., t \geq 0 мин.$
12	$q^{12}(t) = \begin{cases} 55\ млн.м^3 в\ сут.,\ t \leq 360 мин. \\ 70\ млн.м^3 в\ сут.,\ t > 360 мин. \end{cases}$	19	$q^{19}(t) = \begin{cases} 10\ млн.м^3 в\ сут.,\ t \leq 120 мин. \\ 30\ млн.м^3 в\ сут.,\ t > 120 мин. \end{cases}$

На рис. 5 – 7 представлены графики зависимости параметров газового потока от времени для 3-й нитки (на которой расположены краны V_36 и V_40) в местах расположения крановых площадок.

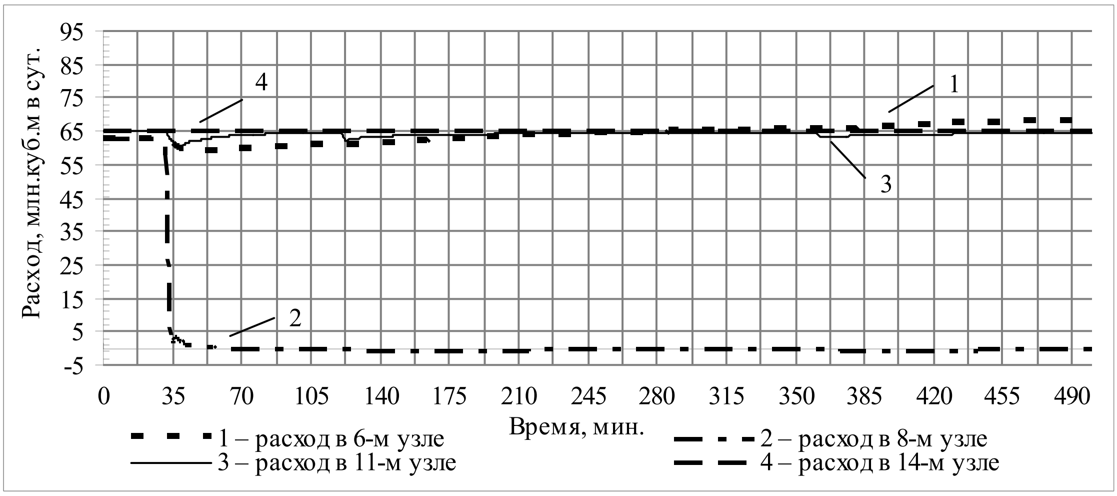

Рис. 5. График зависимости расхода от времени в узлах ММГ (3-я нитка)

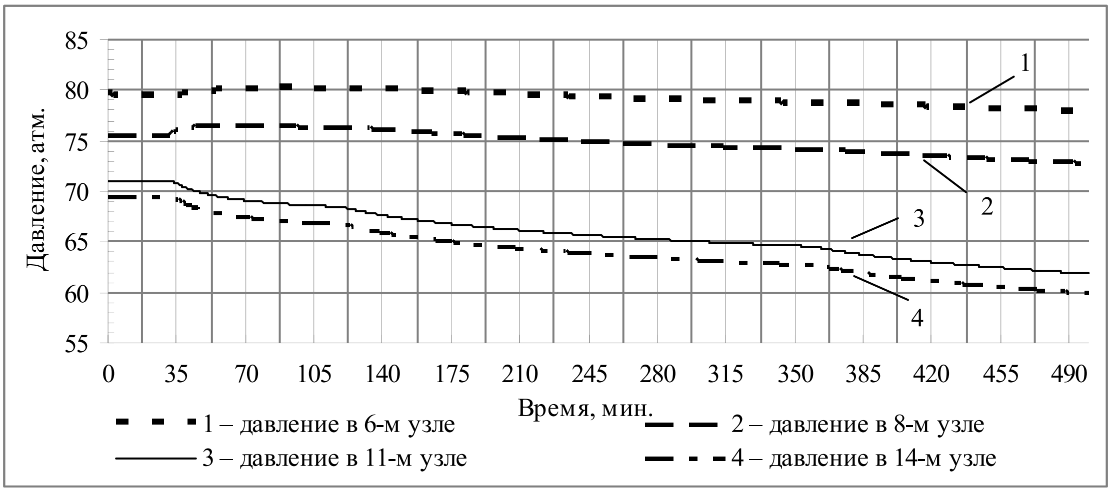

Рис. 6. График зависимости давления от времени в узлах ММГ (3-я нитка)

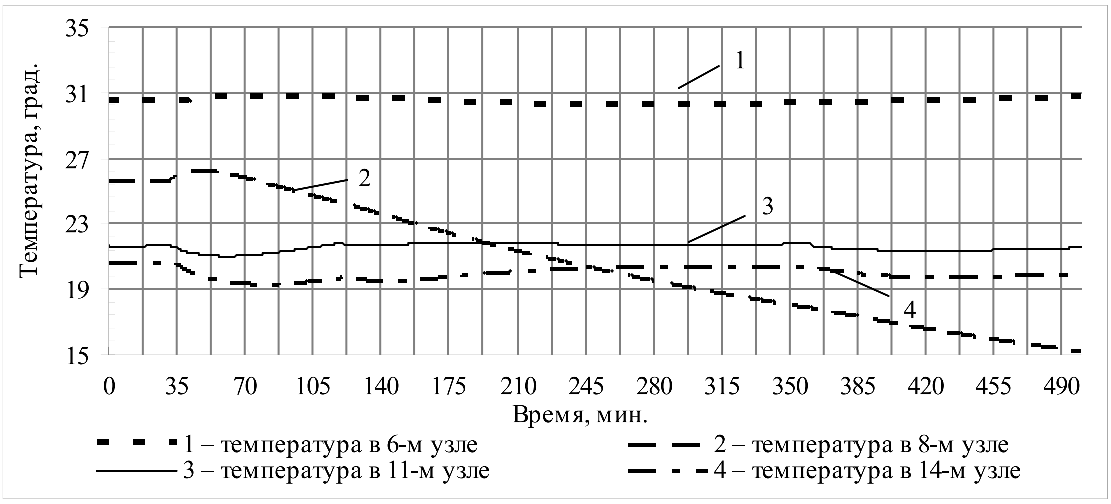

Рис. 7. График зависимости температуры от времени в узлах ММГ (3-я нитка)

5. Вывод

Новизна – впервые предложен метод расчета ННРТГ в ЛУ ММГ, математическая модель которых включает в себя математические модели участков трубопровода и запорной арматуры, отличающийся от существующих методов расчета способом включения и исключения уравнений моделей всех элементов ММГ в общую систему уравнений общей математической модели и позволяющий с высокой точностью рассчитывать реальные процессы течения газа в ММГ в реальном масштабе времени, а также прогнозировать различные ситуации в целях принятия необходимых управляющих воздействий. В качестве математической модели по УТ взята система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая ННРТГ.

Экспериментальные исследования, проведенные по различным тестовым примерам, показали, что предложенный метод расчета ННРТГ в ММГ через запорную арматуру можно применять при моделировании переходных процессов в магистральных газопроводах с учетом времени полного перекрытия кранов.

Практическая значимость – учет действия запорной арматуры на ММГ позволяет наиболее адекватно описывать ННРТГ по ЛУ в ММГ. Важность разработанного метода состоит в том, что расчет ННРТГ по ММГ с учетом динамики работы запорной арматуры позволит в дальнейшем моделировать аварийные ситуации в целях своевременной локализации аварий на магистральных газопроводах.

Список литературы: 1. *Тевяшев А.Д., Гусарова И.Г., Каминская А.В.* Математическая модель и метод расчета нестационарных режимов в линейных участках магистральных газопроводах // Радиоэлектроника и информатика. 2007. № 2(37). С. 144-150. **2.** *Тевяшев А.Д., Гусарова И.Г., Буданцева Ю.В.* Особенности численного моделирования нестационарных неизотермических режимов транспорта газа по фрагменту сети с активными элементами // Проблемы нефтегазовой промышленности: Сб. научн. трудов. Вып. 5. Киев, 2007. С. 446-452. **3.** *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.

Поступила в редколлегию 11.04.2009

Тевяшев Андрей Дмитриевич, академик УНГА, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: теория стохастических моделей. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14,тел. (057) 702-14-36.

Гусарова Ирина Григорьевна, канд. техн. наук, проф. кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование и управление систем с распределенными параметрами. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-14-36.

Каминская Анна Владимировна, аспирантка кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: численное моделирование трубопроводных систем.Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-14-36.