

УДК 517-4

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА ПО ЛИНЕЙНОМУ УЧАСТКУ ГАЗОПРОВОДА

Данилушкин Александр Иванович,

доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения
промышленных предприятий электротехнического факультета Самарского
государственного технического университета, Россия, 443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244, гл. корпус. E-mail: aidanilushkin@mail.ru

Данилушкин Иван Александрович,

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и управления
в технических системах факультета автоматики и информационных
технологий Самарского государственного технического университета,
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, гл. корпус.
E-mail: idanilushkin@mail.ru

Работа посвящена решению актуальной задачи повышения энергоэффективности процессов транспортировки газа.

Цель работы. Создание вычислительной модели процесса транспортировки газа, обладающей достаточной точностью и приемлемой вычислительной сложностью для решения задачи оптимального распределения нагрузки между оборудованием компрессорных цехов газопровода.

Методы исследования. Аналитическая модель процесса, изначально сформулированная в виде уравнения теплопроводности с учетом пространственного распределения температуры потока, с помощью методов структурной теории распределённых систем представлена в виде системы из распределённых передаточных функций. Задача рассматривается в одномерной постановке, взаимное влияние температурных полей потока и грунта описывается за счёт включения соответствующих слагаемых в правые части уравнений. Компьютерное моделирование и параметрическая идентификация полученной системы выполнены в пакете численного моделирования нелинейных динамических систем с сосредоточенными параметрами. Переход от распределённого представления к многосвязной сосредоточенной системе осуществлён за счёт аппроксимации распределённых сигналов по пространственной координате. Точность аппроксимации определяется количеством имеющихся точек контроля температуры по длине участка транспортировки газа. Идентификация системы проводилась по результатам пассивного эксперимента.

Результаты. Предложен подход к созданию компьютерной модели температуры газа на выходе линейного участка газопровода, учитывающий пространственную распределённость процесса теплоотдачи потока газа. В модели учтены изменяющаяся скорость потока, взаимное влияние температурных полей грунта и потока газа, влияние температуры воздуха. Приведен результат идентификации модели. Проведён анализ преимуществ и недостатков разработанной модели. Разработанная вычислительная модель процесса транспортировки газа по линейному участку обладает всеми необходимыми параметрами для использования её при оптимизации режимов работы оборудования компрессорных цехов газопровода.

Ключевые слова:

Газопровод, компрессорный цех, линейный участок, температурное поле, объект с распределёнными параметрами, поток, численно-аналитическая модель, идентификация.

Введение

Один из способов повышения энергоэффективности технологических процессов – выбор наиболее экономичного режима работы оборудования при заданных параметрах производительности [1]. Выбор режима осуществляется путём решения задачи оптимизации параметров технологических процессов с помощью компьютерного моделирования. Такой подход подразумевает создание достаточно точных моделей технологических процессов и поддержание их в актуальном состоянии при меняющихся со временем характеристиках оборудования. Для периодической актуализации моделей необходим постоянный сбор информации о ведении технологических процессов, что невозможно без внедрения современных систем автоматизированного управления [2, 3]. При этом современные автоматизированные системы должны разрабатываться с перспективой реализации на их основе интеллектуальных систем моделирования и оптимизации технологических процессов

[4–6]. Полная оснащённость процесса транспортировки газа системами автоматизированного управления позволяет использовать накапливаемую ими архивную информацию для проведения пассивной идентификации модели технологического процесса.

Разработка модели и метода её идентификации представляют собой отдельную задачу. Модель должна разрабатываться с учётом использования её в итерационных процессах поиска оптимума и обладать низкой вычислительной ресурсоёмкостью. Кроме того, процесс идентификации модели должен обеспечивать приемлемые результаты при имеющихся ограничениях по объёму и качеству экспериментально полученных данных о поведении реального объекта. В статье предлагается подход к построению модели, учитывающий, с одной стороны, пространственную протяжённость объекта исследования, а с другой – набор экспериментальных данных, полученных в фиксированных точках по длине линейного участка газопровода.

Выбор математического аппарата

Математическая модель транспортировки газа по трубопроводу должна учитывать пространственную протяжённость объекта моделирования. Давление газа, скорость потока и температура взаимосвязаны и меняются в процессе движения потока по газопроводу. В процессе транспортировки газ охлаждается, отдавая часть тепловой энергии грунту, в котором проложен газопровод. Процесс теплообмена между потоком газа и грунтом зависит от разности их температур и протекает с разной интенсивностью в разных точках по длине газопровода. На температуру грунта влияет температура наружного воздуха, значения которой меняются по длине газопровода. Зависимость математической модели не только от времени, но и от пространственной координаты позволяет учесть аппарат уравнений математической физики [7, 8].

В общем случае можно выделить три подхода к решению уравнений математической физики. Использование аналитических методов [7–10] позволяет получить решения с низкой вычислительной ёмкостью, но их применение ограничено каноническими формами тел и стационарными параметрами уравнений. Кроме того, поиск точного решения резко усложняется при описании объекта системой дифференциальных уравнений в частных производных.

Методы численного решения дифференциальных уравнений в частных производных и реализующие их компьютерные пакеты [11] позволяют получить решение с высокой точностью, обеспечивают учёт произвольной геометрии и нестационарных характеристик. Ряд современных работ посвящены численному моделированию тепло- и массопереноса при транспортировке газа [12, 13] и оценке точности моделей по реальным данным. Однако их использование в итерационных алгоритмах расчёта затруднительно из-за существенной вычислительной ресурсоёмкости. Кроме того, узким местом использования как аналитических, так и численных моделей является сложность определения физических характеристик взаимодействующих сред для конкретных условий.

В статье продемонстрированы возможности подхода, опирающегося на численно-аналитическое моделирование процесса теплообмена. Подход ранее был опробован при построении модели противоточного теплообменного аппарата [14], изначально описанного системой гиперболических уравнений. В работе [15] были сформулированы общие принципы использования численно-аналитического моделирования объектов и систем с распределёнными параметрами. Подход основывается на структурной теории распределённых систем [9, 10] и заключается в пространственной аппроксимации распределённых сигналов, описывающих взаимное влияние друг на друга отдельных объектов с распределёнными параметрами. В работе [16] предложено применение сплайн-интерполяции для перехода от пространственно-распределённых сигналов к набору сосредоточенных.

Численно-аналитическая модель теплообмена на линейном участке газопровода

Математическая модель процесса охлаждения газа основана на следующих допущениях [17]:

- 1) физические свойства газа и грунта неизменны;
- 2) скорость потока газа по всему сечению газопровода одинакова;
- 3) смешение газа в направлении движения потока незначительно и не учитывается;
- 4) смешение газа в направлении, перпендикулярном движению потока, полное;
- 5) стенка трубопровода принимается теплотехнически тонким телом и не учитывается при создании модели;
- 6) скорость теплопередачи в любой точке линейного участка газопровода пропорциональна разности температур потока и грунта.

В качестве аналитической модели температурного распределения газа по длине линейного участка газопровода используется уравнение теплового баланса для движущегося с переменной скоростью потока [9]:

$$\frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial t} + v(t) \frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial x} = \beta_g (T_g(x, t) - \Theta(x, t)),$$

$$0 \leq x \leq x_1, \quad t > 0, \quad (1)$$

с начальными

$$\Theta(x, 0) = \Theta_0$$

и граничными условиями

$$\Theta(0, t) = \Theta_0(t), \quad \frac{\partial \Theta(\infty, t)}{\partial x} = 0.$$

Здесь $\Theta(x, t)$ – температура газа в точке x , в момент времени t ; $T_g(x, t)$ – температура грунта в точке x , в момент времени t ; $\Theta_0(t)$ – температура газа на входе линейного участка газопровода; $v(t)$ – скорость потока газа в газопроводе, зависящая от времени t ; β_g – обобщённый коэффициент теплообмена между грунтом и потоком газа, учитывающий геометрию поверхности взаимодействия; x_1 – длина линейного участка газопровода.

Уравнение (1) не может быть решено аналитически, поскольку содержит произведение двух функций, зависящих от времени: $v(t) \frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial x}$. Однако при небольших отклонениях функций, участвующих в произведении от некоторого среднего значения, можно выполнить линеаризацию уравнения (1) и затем получить решение для линеаризованного уравнения [18]. Для этого температура газа, $\Theta(x, t)$, грунта, $T_g(x, t)$, и скорость потока, $v(t)$, представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Theta(x, t) &= \Theta_c(x) + \Delta\Theta(x, t), \\ v(t) &= v_c + \Delta v(t), \\ T_g(x, t) &= T_{gc} + \Delta T_g(x, t), \end{aligned}$$

где $\Theta_c(x, t)$ – температурное распределение потока по длине газопровода в установившемся режиме при постоянной скорости потока v_c и температуре грунта, постоянной по всей длине T_{gc} ; $\Delta\Theta(x, t)$ – отклонение температурного распределения, вызван-

ное изменением скорости $\Delta v(t)$ и изменением температуры грунта $\Delta T_g(x, t)$. Линеаризованное уравнение (1) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \Theta(x, t)}{\partial t} + v_c \frac{\partial \Delta \Theta(x, t)}{\partial x} + \beta_g \Delta \Theta(x, t) = \\ = \beta_g (T_{gc} + \Delta T_g(x, t) - \Theta_c(x)) - \\ - v_c \frac{\partial \Theta_c(x)}{\partial x} - \Delta v(t) \frac{\partial \Theta_c(x)}{\partial x}. \end{aligned} \quad (2)$$

В установившемся режиме все отклонения будут равны нулю, и уравнение (2) упростится до

$$v_c \frac{\partial \Theta_c(x)}{\partial x} + \beta_g \Theta_c(x) = \beta_g T_{gc},$$

решив которое можно будет получить выражение для температурного распределения потока $\Theta_c(x, t)$ в установившемся режиме:

$$\Theta_c(x) = T_{gc} (1 - \exp(-x\beta_g/v_c))$$

и, соответственно, для значения производной $\frac{\partial \Theta_c(x)}{\partial x}$, участвующей в уравнении (2):

$$\frac{\partial \Theta_c(x)}{\partial x} = \frac{1}{v_c} \beta_g T_{gc} \exp(-x\beta_g/v_c). \quad (3)$$

С учётом (3) уравнение (2) приводится к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial t} + v_c \frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial x} + \beta_g \Theta(x, t) = \\ = \beta_g T_g(x, t) - \frac{\Delta v(t)}{v_c} T_{gc} \beta_g \exp(-x\beta_g/v_c). \end{aligned} \quad (4)$$

Решение уравнения (4) возможно только при заданных выражениях для функций $T_g(x, t)$ и $\Delta v(t)$, входящих в его правую часть. В случае, когда вид функций заранее неизвестен, удобно перейти к анализу модели в изображениях по Лапласу. В этом случае решение уравнения (4) может быть найдено в виде [9, 10]

$$\Theta(x, p) = \int_0^{x_1} W(x, \xi, p) \cdot \omega(\xi, p) d\xi, \quad (5)$$

где передаточная функция $W(x, \xi, p)$ и стандартизирующая функция $\omega(x, p)$ имеют вид

$$W(x, \xi, p) = \mathbf{1}(x - \xi) \frac{1}{v_c} \exp\left(-\frac{p + \beta_g}{v_c}(x - \xi)\right), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \omega(x, p) = \beta_g T_g(x, p) + v_c \delta(x) \Theta_0(p) - \\ - \frac{\Delta v(p)}{v_c} T_{gc} \beta_g \exp(-x\beta_g/v_c). \end{aligned} \quad (7)$$

Температура грунта $T_g(x, p)$ по длине газопровода определяется, с одной стороны, температурой газа в каждой точке x , с другой – температурой наружного воздуха $T_a(x, p)$. Влияние температуры грунта на температуру газа учтено в уравнении (1). Однако сама температура грунта также зависит от температуры газа и от температуры наружного воздуха. Эту зависимость в первом приближении можно выразить следующим образом:

$$T_{gp}(x, p) = W_1(p)T_a(x, p) + W_2(p)\Theta(x, p);$$

$$\begin{aligned} W_1(p) &= \frac{k_1}{(T_1 p + 1)(\tau_1 p + 1)}; \\ W_2(p) &= \frac{k_2}{(T_2 p + 1)(\tau_2 p + 1)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где k_1, k_2 – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния температуры воздуха и температуры газа на температуру грунта соответственно; T_1, τ_1, T_2, τ_2 – постоянные времени, определяющие динамику изменения температуры грунта при изменении соответствующих температур воздуха и газа.

Все коэффициенты, входящие в состав уравнения (8), могут быть получены с помощью параметрической идентификации аналитической модели на основе статистических данных о поведении температур в процессе эксплуатации линейного участка газопровода.

Измерение температуры наружного воздуха и газа осуществляется только на входе и выходе линейного участка газопровода, что не позволяет использовать выражение (8) для определения температуры грунта $T_g(x, p)$ в каждой точке участка газопровода. В работе принято, что температурное распределение грунта описывается кусочно-линейной зависимостью вида

$$T_g(x, p) = \begin{cases} T_g(0, p) + \\ + \frac{x}{L} (T_g(x_1, p) - T_g(0, p)), & \text{при } x < L; \\ T_g(x_1, p), & \text{при } x \geq L, \end{cases} \quad (9)$$

где L – расстояние от начала линейного участка газопровода, на котором происходит равномерное снижение температуры грунта от значения температуры грунта на входе, $T_g(0, p)$, до значения температуры грунта на выходе, $T_g(x_1, p)$. После точки $x=L$ температура грунта принимается равной температуре на выходе линейного участка. Параметр L подбирается в процессе параметрической идентификации модели.

Температура газа в любой точке линейного участка газопровода определяется выражением (5). Кусочно-линейная зависимость температурного распределения грунта от пространственной координаты (9) позволяет при простейшем интегрировании (5) разбить его на два участка линеаризации: $[0, L]$ и $[L, x_1]$. Изменение температуры грунта на каждом из участков линеаризации описывается линейной зависимостью вида

$$T_g(x, p) = k(p)x + b(p), \quad (10)$$

а значит, искомая модель может быть представлена в виде последовательного соединения моделей двух участков. При этом температура газа на выходе первого участка является температурой газа на входе второго.

Температура газа на выходе участка с линейно изменяющейся температурой грунта $\Theta_{out}(p)$ определяется выражением

$$\Theta_{out}(p) = W_{in}(x_{out}, p)\Theta_{in}(p) + W_k(x_{out}, p)k(p) + W_b(x_{out}, p)b(p) + W_{\Delta v}(x_{out}, p)\Delta v(p), \quad (11)$$

где $\Theta_{in}(p)$ – температура газа на входе газопровода; $k(p)$ и $b(p)$ – коэффициенты, описывающие линейную зависимость температуры грунта от пространственной координаты; $\Delta v(p)$ – изменение скорости потока газа (рис. 1).

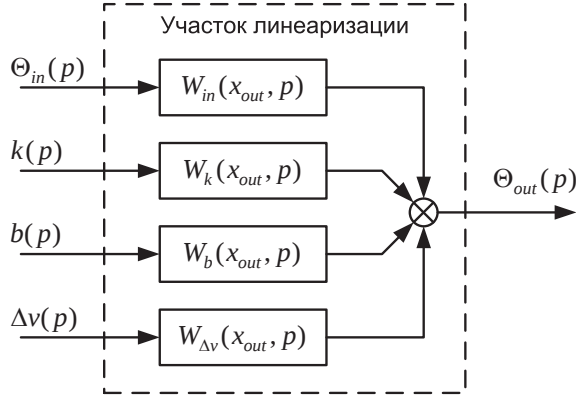


Рис. 1. Структурная схема модели участка линейаризации (УЛ)

Fig. 1. Block diagram of the linearization section (LS)

Передаточные функции, описывающие динамику поведения температуры газа на выходе $\Theta_{out}(p)$, в зависимости от изменения соответствующих входных параметров, определяются посредством вычисления интеграла (5) с подстановкой выражений (6), (7) и (10) и принимают вид

$$W_{in}(x_{out}, p) = \exp(-x_{out}(p + \beta_g)/v_c); \quad (12)$$

$$W_k(x_{out}, p) = \frac{\beta_g x}{p + \beta_g} - \frac{\beta_g v_c}{(p + \beta_g)^2} (1 - \exp(-x_{out}(p + \beta_g)/v_c)); \quad (13)$$

$$W_b(x_{out}, p) = \frac{\beta_g}{p + \beta_g} (1 - \exp(-x_{out}(p + \beta_g)/v_c)); \quad (14)$$

$$W_{\Delta v}(x_{out}, p) = -\frac{1}{v_c} \frac{T_{gc} \beta_g}{p} \exp(-x_{out} \beta_g / v_c) \times (1 - \exp(-x_{out} p / v_c)), \quad (15)$$

где x_{out} – длина участка с линейно изменяющейся температурой грунта.

Расчёт значения температуры газа на выходе линейного участка газопровода на базе полученной модели осуществляется следующим образом. В качестве исходных данных выступают графики поведения температуры наружного воздуха на входе и выходе линейного участка газопровода, температуры и скорости потока газа на входе линейного участка. Графики должны содержать значения параметров за несколько последних суток, до момента, в который производится расчёт. Тогда, задаваясь прогнозными (желаемыми) значениями пара-

метров в ближайшем будущем, можно получить прогноз изменения температуры на выходе линейного участка газопровода.

Идентификация численно-аналитической модели

Численно-аналитическая модель температуры газа может быть реализована в пакете компьютерного моделирования динамических систем, например в MATLAB/Simulink [19, 20]. Структура модели, учитывающая влияние температуры и расхода газа на входе и наружного воздуха на входе и выходе линейного участка, приведена на рис. 2. На вход модели поступают: температура газа на входе линейного участка газопровода $\Theta_0(p)$, температура наружного воздуха на входе и выходе линейного участка газопровода $T_{a0}(p)$, $T_{a1}(p)$, изменение скорости потока $\Delta v(p)$ относительно некоторого среднего значения v_c . В результате численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, определяющей выражениями передаточных функций, рассчитываются значения температуры грунта на входе и выходе линейного участка газопровода, $T_{g0}(p) \equiv T_{g0}(0, p)$ и $T_{g1}(p) \equiv T_{g1}(x_1, p)$, которые затем используются для вычисления коэффициентов линейаризации температурного распределения грунта согласно (9). Сигналы коэффициентов линейаризации поступают на входы блоков участков газопровода (УГ) (рис. 1), которые реализуют расчёт температуры газа на выходе блока, согласно выражению (11), по передаточным функциям (12)–(15). При этом первый блок УГ служит для вычисления температуры газа на выходе участка длиной L , а второй блок – для вычисления температуры на выходе моделируемого линейного участка газопровода, $\Theta_1(p) \equiv \Theta(x_1, p)$.

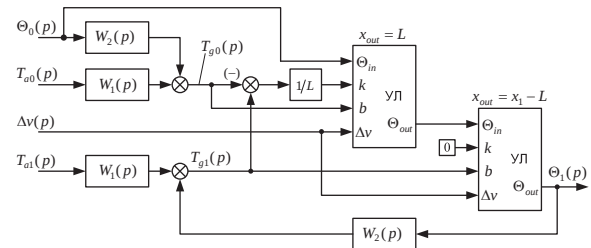


Рис. 2. Структурная схема модели линейного участка газопровода

Fig. 2. Block diagram of the model of gas-main pipeline section

В процессе параметрической идентификации модели осуществлялась настройка параметров передаточных функций $W_1(p)$ и $W_2(p)$: k_1 , T_1 , τ_1 , k_2 , T_2 , τ_2 , значение параметра L и значение приведенного коэффициента теплообмена β_g . При этом в качестве неизменяемых настроек модели выступали: длина линейного участка газопровода, x_1 ; средняя скорость потока газа, v_c ; установившаяся (средняя) температура грунта T_{gc} .

Для оценки близости модели к реальному объекту использовался интеграл модуля рассогласования выхода объекта $\Theta_1^*(t)$ и модели $\Theta_1(t)$.

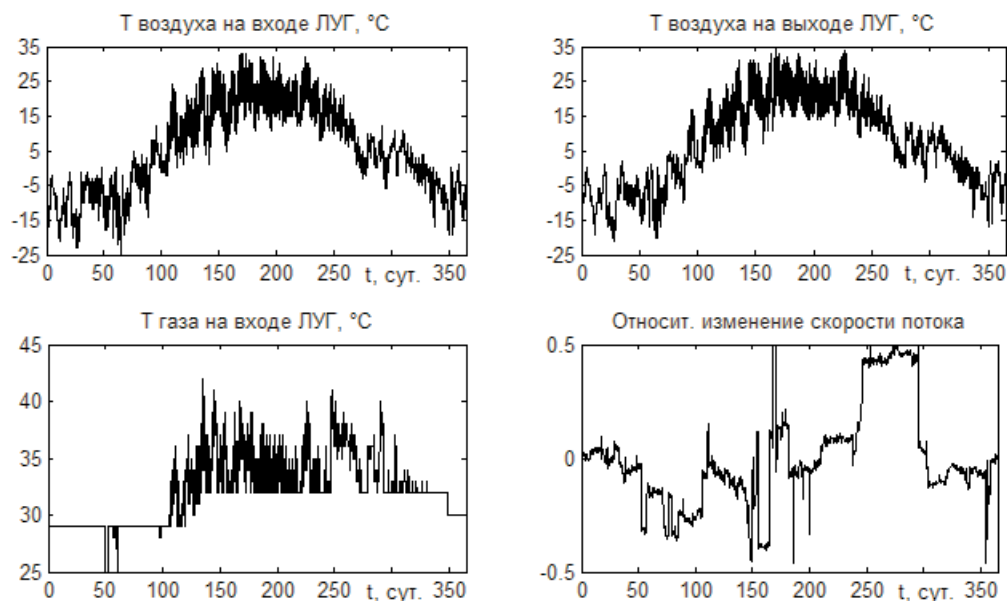


Рис. 3. Исходные данные для идентификации модели

Fig. 3. Original observations for the model identification

В качестве исходных данных для идентификации и валидации использовался годовой архив двухчасовых измерений параметров функционирования линейного участка газопровода. Первые 250 суток годового архива (68 % данных) использовались для проведения идентификации, оставшиеся 115 суток (32 % данных) – для валидации. Графики изменения параметров представлены на рис. 3, 4.

Относительное изменение скорости потока (рис. 3) рассчитывалось как отношение мгновенной скорости к среднегодовой. Скорость потока вычислялась для каждого временного среза с учётом физических характеристик газа, его объёмного расхода, давления и температуры.

На рис. 4 представлен график изменения температуры газа на выходе линейного участка газопровода, а также результат параметрической идентификации разработанной модели.

В результате проведения параметрической идентификации для линейного участка длиной $x_1=110$ км при средней скорости потока $v_c=739$ км/сут. и средней температуре грунта $T_{gc}=10$ °C были получены следующие значения идентифицируемых параметров: $k_1=0,345$, $k_2=0,269$, $T_1=12,2$ сут., $\tau_1=5,7$ сут., $T_2=9,5$ сут., $\tau_2=5,1$ сут., $L=15$ км, $\beta_g=4,11$ сут.⁻¹.

Среднеинтегральное отклонение модуля температуры на выходе модели составляет $0,95^\circ$ на всём диапазоне имеющихся экспериментальных данных. При этом на участке валидации модели среднеинтегральное отклонение модуля температуры составляет $0,6^\circ$. Полученные результаты сопоставимы с результатами моделирования параметров газового потока с помощью численного решения

системы дифференциальных уравнений в виде системы конечно-разностных уравнений в работе [12], где среднеарифметическое отклонение модели от экспериментальных данных составляет $1,57^\circ$ на всём диапазоне.

При решении задачи оптимизации параметров процесса транспортировки газа модель должна обеспечивать точность $\pm 1^\circ$ в статике и до $\pm 3^\circ$ в динамических режимах.

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы.

1. В летний период часто наблюдается ситуация, когда мощности установки охлаждения газа недостаточно для поддержания заданной температуры на входе линейного участка газопровода. Тем не менее, несмотря на значительные отклонения температуры газа на входе линейного участка от заданного значения, температура на выходе остаётся практически постоянной. Это означает, что газ остывает в процессе транспортировки по газопроводу.
2. Разработанная модель обеспечивает достаточное качество прогнозирования поведения температуры газа на выходе линейного участка газопровода в летний, осенний и зимний периоды. Однако в период с середины марта по начало июня результаты моделирования существенно расходятся с реальными данными. Данный период совпадает с периодом таяния снега, повышения влажности земли, что приводит к увеличению теплопроводности грунта и лучшему отводу тепла от газопровода (рис. 4, интервал с 75 по 160 сутки). Для повышения точности модели потребуется ввести зависимость обобщённого коэффициента теплообмена β_g от времени года.



Рис. 4. Температура газа на выходе линейного участка газопровода (сплошная линия) и на выходе модели (пунктир)

Fig. 4. Gas temperature at the outlet of the gas-main pipeline section (solid line) and at the output of the model (dotted line)

Заключение

Предложенная модель может использоваться для изучения влияния режимов работы компрессорной станции, расположенной на входе линейного участка газопровода, на режим работы следующей по ходу магистрали компрессорной станции.

Планируется её применение при оптимизации режимов работы установки охлаждения газа компрессорной станции на входе газопровода и при решении задач оптимального распределения нагрузки между группой последовательно соединённых компрессорных станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yanvarev I.A., Vanyashov A.D., Krupnikov A.V. Thermal management technologies development for the gas transport on the gas-main pipeline // *Procedia Engineering*. – 2015. – № 113. – P. 237–243.
2. Автоматизация диспетчерского управления в газодобывающей компании / С.А. Богдан, А.В. Кудинов, Н.Г. Марков, С.С. Родикевич // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311. – № 5. – С. 29–35.
3. Energy-saving technologies in transportation of natural gas facilities / T. Datsuk, G. Pozin, V. Ulyasheva, M. Kanev // *Procedia Engineering*. – 2015. – № 117. – P. 237–243.
4. Интеллектуализация нефтеперерабатывающих процессов с использованием компьютерных моделирующих систем / Е.Н. Ивашкина, И.М. Долганов, Э.Д. Иванчина, М.В. Киргина, С.А. Фалеев, А.В. Кравцов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 80–86.
5. Системы технологического моделирования для мониторинга и оптимизации нефтеперерабатывающих производств / Е.М. Юрьев, Е.Н. Ивашкина, Э.Д. Иванчина, А.В. Кравцов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2008. – Т. 312. – № 5. – С. 126–132.
6. Информационно-моделирующая система процессов промышленной подготовки газа и газового конденсата / А.В. Кравцов, Н.В. Ушева, О.Е. Мойзес, Е.А. Кузьменко, В.И. Рейзлин, А.А. Гавриков // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 132–137.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
8. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970. – 720 с.
9. Бутковский А.Г. Структурная теория распределённых систем. – М.: Наука, 1977. – 320 с.
10. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
11. Дудников Е.Е. Универсальные программные пакеты для моделирования систем с распределёнными параметрами // *Автоматика и телемеханика*. – 2009. – № 1. – С. 3–24.
12. Helgaker J.F., Ytrehus T. Coupling between continuity/momentum and energy equation in 1D gas flow // *Energy Procedia*. – 2012. – № 26. – P. 82–89.
13. Oosterkamp A., Helgaker J.F., Ytrehus T. Modelling of natural gas pipe flow with rapid transients-case study of effect of ambient model // *Energy Procedia*. – 2015. – № 64. – P. 101–110.
14. Гусева М.А., Данилушкин И.А. Применение пространственной аппроксимации распределённых сигналов при моделировании теплообменных аппаратов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. – 2010. – Вып. 7 (28). – С. 151–157.
15. Данилушкин И.А., Гусева М.А. Численно-аналитическое моделирование систем с распределёнными параметрами // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2012. – № 8 (137). – С. 48–52.
16. Данилушкин И.А. Применение сплайн-интерполяции пространственного распределения в численно-аналитических моделях теплообмена // *Информационные, измерительные и*

- управляющие системы (ИИУС-2012): матер. III Междунар. науч.-техн. конф. 29–31 мая 2012 г. / Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2012. – С. 13–16.
17. Девятков Б.Н., Демиденко Н.Д. Теория и методы анализа управляемых распределённых процессов. – Новосибирск: Наука, 1983. – 272 с.
18. Данилушкин А.И., Рапопорт Э.Я. Алгоритмы функционирования процесса непрерывно-последовательного индукционного нагрева // Алгоритмизация и автоматизация технологических процессов и промышленных установок: межвузовский сборник научных трудов. Вып. VII. – Куйбышев: КПТИ, 1976. – С. 118–124.
19. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
20. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.

Поступила 16.11.2015 г.

UDC 517–4

NUMERICAL ANALYTICAL MODEL OF GAS TRANSPORT ON THE GAS-MAIN PIPELINE

Aleksandr I. Danilushkin,

Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russia. E-mail: aidanilushkin@mail.ru

Ivan A. Danilushkin,

Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russia. E-mail: idanilushkin@mail.ru

The paper is devoted to solving an urgent problem of increasing energy efficiency of gas transportation.

The main aim of the study is to create a computational model of gas transport with adequate accuracy and reasonable computational complexity for solving the problem of optimal load distribution between the equipment of compressor stations of the gas-main pipeline.

The methods used in the study. The analytical model of the process, which was originally formulated as the heat equation taking into account the spatial distribution of the flow temperature, is presented in the form of distributed system transfer functions using the methods of structural theory of distributed systems. The problem is considered in one-dimensional formulation, the mutual influence of temperature fields of flow and soil is described by including the corresponding components in the right sides of the equations. Computer modeling and parametric identification of the system are made with the software for numerical simulation of nonlinear dynamic systems with lumped parameters. The transition from a distributed representation to multicoupling system is realized due to an approximation of the distributed signals along the spatial axis. Accuracy of the approximation depends on the quantity of temperature measuring points along the length of the gas-main pipeline. The identification of the system is based on the results of the passive experiment.

The results. The authors introduced an approach to the development of a computer model of the gas temperature at the outlet of the gas-main pipeline that takes into account the spatial distributed process of the gas flow heat loss. The model takes into account the flow rate change, the mutual influence of temperature fields of the soil and the gas flow, the influence of the air temperature. The results of the identification of the model are given. The analysis of the advantages and disadvantages of the developed model is made. Developed computational model of gas transport on the gas-main pipeline has all the necessary parameters for its using for optimizing operating modes of equipment of the gas-main pipeline compressor stations.

Key words:

Gas pipeline, compressor station, gas-main pipeline, temperature field, object with distributed parameters, flow, numerical analytical model, identification.

REFERENCES

1. Yanvarev I.A., Vanyashov A.D., Krupnikov A.V. Thermal management technologies development for the gas transport on the gas-main pipeline. *Procedia Engineering*, 2015, no. 113, pp. 237–243.
2. Bogdan S.A., Kudinov A.V., Markov N.G., Rodikevich S.S. Avtomatizatsiya dispetcherskogo upravleniya v gazodobyvayushchey kompanii [Automation of dispatching control of gas company]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 5, pp. 29–35.
3. Datsuk T., Pozin G., Ulyasheva V., Kanev M. Energy-saving technologies in transportation of natural gas facilities. *Procedia Engineering*, 2015, no. 117, pp. 237–243.
4. Ivashkina E.N., Dolganov I.M., Ivanchina E.D., Kirgina M.V., Faleev S.A., Kravtsov A.V. Intellectualizatsiya neftepererabatyvayushchikh protsessov s ispolzovaniem kompyuternykh modeliruyushchikh sistem [Intellectualization of oil-refining processes using computer modeling systems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 5, pp. 80–86.
5. Yurev E.M., Ivashkina E.N., Ivanchina E.D., Kravtsov A.V. Sistemy tekhnologicheskogo modelirovaniya dlya monitoringa i optimizatsii neftepererabatyvayushchikh proizvodstv [Systems of technologic simulation for monitoring and optimization of oil refineries productions]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 5, pp. 126–132.
6. Kravtsov A.V., Usheva N.V., Moyzes O.E., Kuzmenko E.A., Reyklin V.I., Gavrikov A.A. Informatsionno-modeliruyushchaya sistema protsessov promyslovoy podgotovki gaza i gazovogo kondensata [The information-modeling system of processes of commercial gas and gas condensate]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 132–137.
7. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [The theory of thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 599 p.

8. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki* [Partial differential equations of mathematical physics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 720 p.
9. Butkovskiy A.G. *Strukturnaya teoriya raspredelennykh sistem* [Structural theory of distributed systems]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 320 p.
10. Rapoport E.Ya. *Strukturnoe modelirovaniye obektov i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami* [Structural modeling of objects and control systems with distributed parameters]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 299 p.
11. Dudnikov E.E. Universalnye programmnye pakety dlya modelirovaniya sistem s raspredelennymi parametrami [Universal software packages to model the distributed parameter systems]. *Automation and Remote Control*, 2009, no. 1, pp. 1–19.
12. Helgaker J.F., Ytrehus T. Coupling between continuity/momentum and energy equation in 1D gas flow. *Energy Procedia*, 2012, no. 26, pp. 82–89.
13. Oosterkamp A., Helgaker J.F., Ytrehus T. Modelling of natural gas pipe flow with rapid transients-case study of effect of ambient model. *Energy Procedia*, 2015, no. 64, pp. 101–110.
14. Guseva M.A., Danilushkin I.A. Primenenie prostranstvennoy approksimatsii raspredelennykh signalov pri modelirovanii teploobmennyykh apparatov [Application of spatial approximation of the distributed signals for modeling of heat exchangers]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskie nauki»*, 2010, iss. 7 (28), pp. 151–157.
15. Danilushkin I.A., Guseva M.A. Chislenno-analiticheskoye modelirovaniye sistem s raspredelennymi parametrami [Numerical analytical modeling systems with distributed parameters]. *Mekhanika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2012, no. 8 (137), pp. 48–52.
16. Danilushkin I.A. Primeneniye splayn-interpolyatsii prostranstvennogo raspredeleniya v chislenno-analiticheskikh modelyakh teploobmena [Application of spline interpolation of the spatial distribution in numerical and analytical models of heat transfer]. *Mater. III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Informatsionnye, izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy (IIUS-2012)»* [Proc. III Int. scientific conf. Systems of information, measuring and control]. Samara, 2012. pp. 13–16.
17. Devyatov B.N., Demidenko N.D. *Teoriya i metody analiza upravlyaemykh raspredelennykh protsessov* [Theory and methods of analysis of controlled distributed processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 272 p.
18. Danilushkin A.I., Rapoport E.Ya. Algoritmy funktsionirovaniya protsessa nepreryvno-posledovatel'nogo induktsionnogo nagreva [Algorithms of functioning of process of continuously-sequential induction heating]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Algoritmizatsiya i avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i promyshlennykh ustanovok»* [Interuniversity collection of scientific papers. Algorithmization and automation of technological processes and industrial plants]. Iss. VII. Kuybyshev, 1976. pp. 118–124.
19. Chernykh I.V. *SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy* [SITILINK: software for creation of engineering applications]. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2003. 496 p.
20. Dyakonov V.P. *Simulink 5/6/7: samouchitel* [Simulink 5/6/7: teach-yourself book]. Moscow, DMK-Press, 2008. 784 p.

Received: 16 November 2015.