УДК 622.691.4.052

МЕТОДЫ РАСЧЕТА РЕЖИМА РАБОТЫ СЛОЖНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

METHODS OF CALCULATION OF AN OPERATING MODE OF DIFFICULT MAIN GAS PIPELINES

Ванчин А. Г.
ГОУ ВПО «Российский университет нефти и газа им. И.М. Губкина»,
г. Москва, Российская Федерация

A.G. Vanchin
SEI HPE “Russian State University of Oil and Gas of a name of I.M. Gubkin”,
Moscow, the Russian Federation
e-mail: alex_vanchin@mail.ru

Аннотация. Магистральные газопроводы являются главной частью газотранспортной системы. Основная доля затрат энергоресурсов в трубопроводном транспорте газа приходится на эту часть системы. Характеристики трубопроводной сети, наряду с поставленными технологическими задачами, являются определяющими факторами для режима работы остального оборудования системы, располагающегося в основном на компрессорных станциях.

В связи с этим весьма важным является обеспечение возможности производить расчет режима работы магистрального газопровода с достаточной степенью точности. При этом должен быть предусмотрен учет всех значимых факторов, влияющих на работу магистрального газопровода. Метод расчета не должен содержать в своем составе неразрешимых трудностей математического характера.

Несмотря на кажущуюся простоту конструкции газопровода, в нем протекают сложные процессы движения, трения, взаимодействия с

гравитацией, внутреннего и внешнего теплообмена. Эти процессы, как правило, изменяются во времени, то есть являются нестационарными.

Так же, газотранспортная система имеет сложную схему, в которой простые газопроводы объединяются в транспортную сеть, режим работы всех элементов которой взаимосвязан.

Из-за сложности этих процессов, они имеют достаточно сложное описание с помощью соответствующих математических моделей, получение решений которых сопряжено с рядом трудностей математического характера. Упрощение же моделей, с целью обойти указанные трудности, может привести к снижению степени их соответствия описываемому объекту.

В данной работе рассмотрены существующие методы расчета сложных газопроводов, проведен их анализ.

Дана классификация моделей по признаку области применения.

Выявлены этапы построения, присущие всем рассмотренным универсальным моделям.

По результатам исследования сделан вывод о необходимости дальнейшей проработки вопроса математического моделирования движения газа в сложных магистральных газопроводах и намечены продуктивные, по мнению автора, направления дальнейших исследований по этой теме.

Abstract. The main gas pipelines are the body of the gas transmission system. The main share of expenses of energy resources in the pipeline transport of gas belongs to this part of the system. Characteristics of the pipeline network, also as the set technological tasks, are defining factors for an operating mode of other equipment of system which settles down generally at compressor stations.

In this regard, it is very important to provide possibility of calculation of an operating mode of the main gas pipeline with sufficient degree of accuracy. For this purpose you have to consider all significant factors which influence

operation of the main gas pipeline. The method of calculation shouldn't contain insoluble difficulties of mathematical character.

In spite of the simple construction of the gas pipeline at first sight, it contains difficult processes of movement, friction, interaction with gravitation, internal and external heat exchange. These processes, as a rule, change in time therefore they are non-stationary.

The gas transmission system has the difficult scheme where simple gas pipelines are united in a transport network, the operating mode of all elements is interconnected.

The specified complexity of processes has rather difficult mathematical description of all these processes by means of the corresponding models, in this regard; obtaining decisions is accompanied by difficulties of mathematical character. Simplification of models for the avoidance of the specified difficulties can reduce their compliance to the described object.

The author of this work considers existing methods of calculation of simple gas pipelines, does their analysis.

The author classifies models concerning a scope.

The author revealed construction stages for all considered universal models.

By results of the research the author draws a conclusion about the necessity of the solution of the question of mathematical modeling of gas movement in the main gas pipeline and notes the productive directions of further researches of this subject.

Ключевые слова: нестационарный режим, оптимизация, транспорт природного газа, техническое состояние, газоперекачивающий агрегат, гидравлический расчет, оптимальный режим, гидравлическая модель, диагностика, гидравлический расчет, коэффициент сопротивления.

Key words: non-stationary mode, optimization, transport of natural gas, technical condition, gas-distributing unit, hydraulic calculation, optimum mode, hydraulic model, diagnostics, hydraulic calculation, resistance coefficient.

Классификация моделей сложных газопроводов

В основе расчета сложных газопроводов лежат способы расчета простых газопроводов.

Кроме очевидного разделения задач гидравлического расчета сложных газопроводов на стационарные и нестационарные, так же в литературе прослеживаются две основных группы задач, различающихся по структуре изучаемых объектов.

Первая группа - это частные модели для решения немногочисленного ряда вариантов сложных газопроводов, таких как: газопроводы с путевыми отборами и подкачками, многониточные газопроводы, газопроводы с лупингами, газопроводы, состоящие из последовательно соединенных газопроводов разного диаметра, газопроводы с местными сопротивлениями, закольцованные газопроводы.

Вторая группа - это универсальные модели, дающие возможность нахождения решений применительно к газотранспортной системе любой топологии.

Всем универсальным моделям, как выясняется при рассмотрении существующих работ, несмотря на их разнообразие, присущи общие принципы формирования.

Например, однозначно прослеживаются два основных этапа их построения.

<u>На первом этапе</u> разрабатываются модели для каждого типа элементарных объектов, входящих в состав газотранспортной системы. Полученные виды решений всех этих моделей должны обеспечивать их взаимную совместимость при составлении из них модели сложной трубопроводной системы и возможность последующего их совместного решения, существующими на данный момент, математическими методами.

<u>На втором этапе</u> с применением того или иного аппарата формализации составляется модель, рассматриваемой сложной трубопроводной системы,

как структуры, состоящей из отдельных блоков - моделей элементарных объектов.

Далее рассмотрим некоторые примеры, как частных, так и универсальных моделей для обоих вариантов режима (стационарного и нестационарного).

Расчет частных случаев стационарных режимов работы сложных газопроводов

Подробный порядок расчета стационарного режима работы участка магистрального трубопровода представлен в нормах технологического проектирования магистральных газопроводов[8].

Согласно [8], формула расчета пропускной способности газа в нормальных условиях (*млн м*^{3}*/сутки* при 293,15 *К* и 0,1013 *МПа*) однониточного участка газопровода для всех режимов течения газа, без учета рельефа трассы газопровода:

$$q = 3{,}32 \cdot 10^{-6} \cdot d^{2,5} \cdot \sqrt{\frac{P_н^2 - P_к^2}{\lambda \cdot \Delta \cdot T_{ср} \cdot Z_{ср} \cdot L}}, \qquad (1)$$

с учетом рельефа трассы:

$$q = C_1 \cdot d^{2,5} \cdot \sqrt{\frac{P_н^2 - P_к^2 \cdot (1 + a \cdot h_k)}{\lambda \cdot \Delta \cdot T_{ср} \cdot Z_{ср} \cdot L \cdot \left[1 + \frac{a}{2 \cdot L} \cdot \sum_{i=1}^{n} (h_i + h_{i+1}) \cdot l_i\right]}}, \qquad (2)$$

$$a = \frac{\Delta}{14{,}64 \cdot T_{ср} \cdot z}, \qquad (3)$$

где d – внутренний диаметр трубы, *м*; $P_н$, $P_к$ – абсолютные давления в начале и конце участка газопровода, соответственно, *МПа*; C_1=105,087; Δ – относительная плотность газа по воздуху; $T_{ср}$ – средняя по длине участка газопровода температура транспортируемого газа, *К*; $Z_{ср}$ – средний по длине газопровода коэффициент сжимаемости газа, безразмерный; L – длина участка газопровода, *км*; λ – коэффициент гидравлического сопротивления участка газопровода, безразмерный; h_k – превышение или снижение конечной точки расчетного участка относительно начальной точки; h_i – превышение или снижение *i*-ой точки трассы относительно начальной точки; l_i – длина *i*-го элемента участка газопровода.

Так же, в [8] детально описаны все необходимые практические аспекты расчета магистрального газопровода: расчет с учетом рельефа трассы, определение показателей природного газа, коэффициента сопротивления трению, всех показателей, необходимых для расчета теплообмена для всех вариантов прокладки газопровода.

В [13] рассмотрены частные модели для расчета стационарного режима некоторых вариантов сложных газопроводов.

На основе формулы расчета пропускной способности однониточного участка газопровода (1), путем введения обозначений: $K = \frac{\pi}{4}\frac{T_{ст}}{p_{ст}}\sqrt{R_{возд}}$;

$A_0 = \frac{K}{\sqrt{zT\Delta}}$; $B_0 = \frac{1}{A_0^2}$; $d_э$ – эквивалентный внутренний диаметр трубы, *м*;

$k_p = \left(\frac{d}{d_0}\right)^{2.6} = \frac{Q}{Q_0}$ – коэффициент расхода газопровода;

$\chi = \frac{d_0^{2,6}\cdot k_p}{\sqrt{L}} = \frac{d_э^{2,6}}{\sqrt{L}}$ – «коэффициент приведения», учитывающий диаметр и длину газопровода, были предложены следующие формулы [13].

Для расчета газопровода с путевыми отборами и подкачками:

$$p_н^2 - p_к^2 = B_0\frac{\lambda}{d^5}\cdot\sum_{i=1}^{n}Q_i^2 L_i\,, \tag{4}$$

Для расчета сложного газопровода применима любая из трех формул:

$$Q = A\cdot d_э^{2,6}\cdot\sqrt{\frac{P_н^2 - P_к^2}{L}}\,, \tag{5}$$

$$Q = A\cdot d_0^{2,6}\cdot\sqrt{\frac{P_н^2 - P_к^2}{L}}\cdot k_p\,, \tag{6}$$

$$Q = A\cdot\sqrt{\frac{P_н^2 - P_к^2}{L}}\cdot\chi\,, \tag{7}$$

где Q – расход через газопровод, *млн м³/сутки*; Q_0 – расход через эталонный газопровод, *млн м³/сутки*; $d_э$ – эквивалентный диаметр газопровода, *м*; $T_{ст} = 293\,°K$ – стандартная температура и давление; $p_{ст} = 101{,}3 \cdot 10^3\,Па$ – стандартные температура и давление; $R_{возд} = 287\,м^2/(c^2 \cdot °K)$ – газовая постоянная воздуха; d_0 – эталонный внутренний диаметр трубы, м; Q_i – расход газа через i -й участок газопровода; n - количество участков газопровода; L_i – длина i -го участка газопровода, *км*.

При рассмотрении разных вариантов сложного газопровода используются формулы (5) – (7), при этом эквивалентный внутренний диаметр трубы, коэффициент расхода газопровода и коэффициент приведения определяются для каждого случая по следующим формулам.

Для расчета параллельных газопроводов:

$$d_э^{\,2,6} = \sum_{i=1}^{n} d_{эi}^{\,2,6}, \quad k_p = \sum_{i=1}^{n} k_{pi}, \qquad \chi = \sum_{i=1}^{n} \chi_i . \tag{8}$$

Для расчета последовательных газопроводов:

$$\frac{L}{d_э^{\,2,6}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{L_i}{d_{эi}^{\,2,6}}, \quad \frac{L}{k_p} = \sum_{i=1}^{n} \frac{L_i}{k_p}, \qquad \frac{1}{\chi_p} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\chi_p} . \tag{9}$$

Для расчета сложного газопровода, состоящего из параллельных последовательных газопроводов, он разбивается на отдельные блоки, каждый из которых состоит только из параллельных или только из последовательных газопроводов и далее решается по частям с применением формул (8) и (9). Этот же порядок расчета относится и к газопроводам с лупингами.

Рассмотренный порядок расчета по формулам (5) – (9) применим только к стационарному режиму, при этом не учитывается изменения температуры газа в процессе транспортировки и различия температуры газа в разных участках газопровода.

К тому же, решение более сложных схем, совместно работающих газопроводов этим способом, более трудоемко, чем решение с этой целью машинным способом простой системы однотипных уравнений, в которой каждому участку газопровода соответствует одно уравнение типа (1).

Все эти обстоятельства в совокупности являются причиной существенных ограничений в спектре задач, для которых допустимо практическое использование данного подхода, изложенного здесь на примере материалов из [13]. Сфера его применения – предварительные приблизительные расчеты на этапе проектирования нового газопровода или предварительная оценка нового варианта режима работы действующего газопровода.

Аналогичный подход представлен в [8]. Для оценочных расчетов, гидравлический расчет сложных участков газопроводов без учета рельефа трассы предполагается выполнять исходя из гидравлического расчета эквивалентного однониточного участка по формулам:

$$q = 17,0 \cdot 10^{-6} E \cdot \sqrt{\frac{d_{эк}^{5,2}}{L_{эк}}} \cdot \sqrt{\frac{P_н^2 - P_к^2}{\Delta T_{ср} Z_{ср}}}, \tag{10}$$

$$q = 19,0 \cdot 10^{-6} E \cdot \sqrt{\frac{d_{эк}^{5,2}}{L_{эк}}} \cdot \sqrt{\frac{P_н^2 - P_к^2}{\Delta T_{ср} Z_{ср}}}, \tag{11}$$

где

$$\frac{d_{эк}^{5,2}}{L_{эк}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{L_i}{d_i^{5,2}}}, \tag{12}$$

где n – количество участков с разными диаметрами; L_i – длина i-го участка; d_i – диаметр i-го участка.

Формулы (10) и (11) справедливы при квадратичном режиме течения газа по трубам при значениях эквивалентной шероховатости, соответственно, К = 0,03 *мм* и К = 0,01 *мм*.

Для расчета кольцевых участков газопровода при стационарном режиме можно использовать аналогию между потоком газа в сети трубопроводов и течением электричества в электрических сетях с соответствующими им законами Кирхгофа [9].

Первый закон: алгебраическая сумма газовых потоков, входящих и выходящих из узловых точек, равна нулю – применяют ко всем узлам сети газопроводов, то есть:

$$\sum_{i=1}^{m} q_i = 0, \tag{13}$$

где m – число участков газопроводов, соединяющих узловые точки.

По второму закону, для любого кольцевого газопровода высокого давления алгебраическая сумма перепадов давлений, взятых с соответствующими знаками, при движении газа по газопроводу равна нулю:

$$\sum_{i=1}^{m} \left(p_1^2 - p_2^2\right)_i = 0 \tag{14}$$

где p_1 и p_2 – давления в начале и в конце соответствующих участков газопроводов.

Оценки по возможной области применения, сделанные относительно формул (23) – (28), в той же мере относятся и к методам с применением формул (29) – (30) и формул (31) и (32).

Универсальные модели стационарных режимов работы сложных газопроводов

В качестве примера универсальной стационарной модели, пригодной для нахождения решений применительно к газотранспортной системе любой топологии рассмотрим теорию графов [9].

Модель формируется в два этапа, как и было уже отмечено выше при рассмотрении принципов построения универсальных моделей.

<u>Первый этап</u> составления рассматриваемой модели подробно не описан, но подразумевается выбор модели элементарного участка, описывающей стационарный процесс.

<u>На втором этапе</u> составления рассматриваемой модели применяется теория графов.

Комплекс газопроводной системы, состоящий из узловых точек и связующих элементов, рассматривается как направленный граф, для которого можно записать связующую матрицу A. Колонки этой матрицы представляют связующие элементы узловых точек, а ряды – узловые точки. Элемент a_{ij} матрицы A принимает следующие значения:

– +1, если грань j выходит из узла i;

– -1, если грань j заканчивается в узле i;

– 0, если грань j и узел i не связаны.

Эта связующая матрица определяет конфигурацию системы. При расчете схемы матрицу необходимо дополнить определением кольцевых участков и принятым направлением отсчета. Для этого составляется контурная матрица C с элементами c_{kj}, где k – обозначение контура. Опустим подробности формирования матрицы С, отметив, что для сети из n узловых точек и m граней количество контуров равно: $k = m - n + 1$.

Обозначим поток газа в отдельных связующих элементах m – размерным колонным вектором q, а отбор газа в отдельных узловых точках n – размерным колонным вектором q_0 тогда по закону узловых точек Кирхгофа:

$$\sum_j a_{ij} q_j = q_{0i} \tag{15}$$

Второй закон Кирхгофа для рассматриваемой задачи можно записать так:

$$\sum_j c_{kj} \left(p_1^2 - p_2^2\right)_j = 0 . \tag{16}$$

Показанный способ с применением теории графов действительно позволяет описывать сложную газопроводную систему любой конфигурации, однако имеет ограничения по возможной области применения только для стационарных процессов.

Преимущества метода теории графов, такие как унифицированный подход и высокая степень формализации, обеспечивающая практически неограниченную универсальность в плане топологии газотранспортной сети, имеют и обратную сторону.

Сам способ формирования матриц определяет их большую разбросанность. В некоторых случаях до 98% их элементов равны нулю. Это может приводить к нерациональному расходованию мощности ЭВМ и как следствие – удлинению времени расчетов для сложных схем газопроводов.

В модели не учитываются управляющие воздействия. Поэтому отключение какого-либо из участков сети, что на практике происходит регулярно, потребует каждый раз переработки модели.

Расчет частных случаев нестационарных режимов работы сложных газопроводов

В [9] рассмотрены частные модели для расчета нестационарного режима применительно к некоторым вариантам сложных газопроводов. Для каждого рассматриваемого случая показаны аналитические решения, практически применимые при реальных расчетах и даны рекомендации с учетом их специфики.

В качестве исходной модели автор использует систему уравнений, выведенную для приближенного решения задач неустановившегося движения газа. Рассмотрим ее.

В работе [9] рассматривается одномерное изотермическое течение газа с постоянными физическими параметрами с учетом их распределенности по длине и в пространстве.

Изотермическое неустановившееся движение реальных жидкостей в трубах с постоянным поперечным сечением описывается нелинейной системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial p}{\partial x} = \dfrac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \dfrac{\lambda \rho v^2}{2d} + \rho g \sin\alpha + \dfrac{\partial}{\partial x}\left[(1+\beta)\rho v^2\right] \\ -\dfrac{1}{c^2}\dfrac{\partial p}{\partial t} = \dfrac{\partial(\rho v)}{\partial x} \end{cases}, \quad (17)$$

где d – внутренний диаметр трубы, *м*; x – координата, совпадающая с осью трубы и направленная по течению газа, *м*; p – абсолютное среднее давление газа в сечении, *Па*; v – средняя скорость газа в сечении, *м/сек*; ρ – плотность газа, *кг/м³*; α – угол возвышения трубы над горизонтом, *град.*; $Z_{ср}$ – средний по длине газопровода коэффициент сжимаемости газа, безразмерный; t – время, *сек*; λ – коэффициент гидравлического сопротивления участка газопровода, безразмерный; β – поправка Кориолиса на неравномерное распределение скоростей в выражении количества движения потока через среднюю скорость и среднюю в сечении плотность, безразмерная, за малостью влияния его можно не учитывать (при турбулентном течении $\beta = 0{,}02 - 0{,}03$); c – скорость звука в газе, *м/сек*; g – ускорение свободного падения, 9,81 *м/сек²*; h – высота, на которой находится центр сечения x, *м*.

Формулы (17), являются газодинамическими уравнениями движения и неразрывности для потока сжимаемой среды.

Решение системы уравнений (17) сопряжено с большими трудностями, поэтому прибегают к следующим упрощениям.

Так как скорость движения реальной жидкости меньше скорости звука (v<<c), то некоторыми членами в исходном уравнении (17) можно пренебречь. Тогда для горизонтального трубопровода имеем:

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial p}{\partial x} = \dfrac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \dfrac{\lambda |v|}{2d}\rho v \\ -\dfrac{1}{c^2}\dfrac{\partial p}{\partial t} = \dfrac{\partial(\rho v)}{\partial x} \end{cases}, \quad (18)$$

Если длина трубопровода достаточно велика и потери на трение превосходят ударное давление по формуле Н.Е. Жуковского не менее чем в 3,5÷4 раза, то членом $\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}$ также можно пренебречь. В результате имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\lambda|v|}{2d}\rho v \\ -\frac{1}{c^2}\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} \end{cases}, \tag{19}$$

Однако решение даже этой упрощенной, благодаря учету специфики работы газопровода, системы уравнений (19) составляет определенные трудности. Отмечено [9], что точного аналитического решения систем уравнений, описывающих движение реальных жидкостей в трубах пока не получено, поэтому необходимо применять численные методы, приближенные аналитические или методы сведения нелинейных уравнений к линейным, т. е. различные методы линеаризации.

Во всех предложенных решениях для рассматриваемых вариантов сложных газопроводов применяется способ линеаризации с помощью введения функции, которая учитывает изменения скорости движения жидкости или газа v, коэффициента гидравлического сопротивления λ и диаметра d по длине трубопровода x:

$$f(x,t) = \frac{\lambda(x)\cdot v(x,t)}{2d(x)}, \tag{20}$$

Для случая неустановившегося движения газа с непрерывно распределенным отбором (подкачкой) $q(x,t)$, в результате применения функции (20) нелинейная система (19) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x} = f(x,t)\rho v \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial p}{\partial t} \pm \frac{q(x,t)}{F} = 0 \end{cases}. \tag{21}$$

Нелинейную систему (21) можно привести к уравнению:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{1}{f(x,t)}\frac{\partial f(x,t)}{\partial x} - \frac{f(x,t)}{c^2}\cdot\frac{\partial p}{\partial t} = \pm\frac{f(x,t)}{F}q(x,t). \tag{22}$$

Для случая неустановившегося движения газа с сосредоточенным отбором (подкачкой) выведено следующее уравнение:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{1}{f(x,t)}\frac{\partial f(x,t)}{\partial x}\frac{\partial p}{\partial x}-\frac{f(x,t)}{c^2}\cdot\frac{\partial p}{\partial t}=\pm\frac{f(x,t)}{F}\sum_{i-1}^{n}Q_{mi}(t)\delta(x-x_i)\sigma(t-t_i)\ , \qquad (23)$$

где $Q_{mi}(t)$ – сосредоточенные отборы (подкачки); x_i – расстояние от начала трубопровода до места подключения *i*-го отбора (подкачки); $\delta(x-x_i)$ – обобщенная дельта-функция Дирака для учета отбора (подкачки); $\sigma(t-t_i)$ – функция Хэвисайда для учета момента включения отбора (подкачки).

Для неустановившегося движения газа в кольцевом газопроводе с сосредоточенным отбором (подкачкой) при условии усреднения функции $f(x,t)$ по времени выведено следующее уравнение:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\varphi'(x)}{\varphi(x)}\frac{\partial p}{\partial x}-\frac{\varphi(x)}{c^2}\cdot\frac{\partial p}{\partial t}=\sum_{i-1}^{n}\frac{\varphi(x_i)}{F_i}Q_{mi}(t)\delta(x-x_i)\sigma(t-t_i)\ , \qquad (24)$$

с граничными условиями, учитывающими кольцевой характер схемы:

$$\begin{gathered} p(0,t)=p(0,t);\ \ t\rangle 0 \\ \left.\frac{\partial p}{\partial x}\right|_{x=0}=\left.\frac{\partial p}{\partial x}\right|_{x=L};\ \ t\rangle 0 \end{gathered} \ . \qquad (25)$$

Так же, автором в [10] представлены решения еще для трех частных случаев неустановившегося движения газа в сложной трубопроводной системе: для системы, состоящей из двухкольцевых газопроводов, для телескопического газопровода с неоднородностями, для телескопического газопровода с неоднородностями и отборами (подкачками). При этом применялся подход разбиения этих составных объектов на отдельные более простые части, из которых они состоят.

Ценность частных методов с применением формул (21) – (25) и других упомянутых при рассмотрении книги [9], несомненна, однако к ним в полной мере относятся ограничения в непосредственном применении к расчетам режимов работы реального магистрального газопровода исходной для всех их системы уравнений (19). Эта система уравнений не учитывает воздействия на процесс теплообмена и силы тяжести.

Ограничения в непосредственном применении рассмотренных частных методов обусловлены еще и тем, что они изначально разработаны для конкретных, очень простых вариантов схем, реальные же схемы газотранспортных сетей, как правило, несоизмеримо более сложны.

Вид аналитических решений частных методов с применением формул (21) – (25) таков, что составление модели для газотранспортной системы со сложной топологией из отдельных блоков, в качестве которых будут использоваться рассмотренные выше модели простых участков, приведет в итоге к сложностям в решении весьма громоздкой системы уравнений.

Универсальные модели нестационарных режимов работы сложных газопроводов

В качестве примера универсальной нестационарной модели, рассмотрим метод с применением матрицы элементов сложных трубопроводных систем [10].

Эта модель тоже формируется в два этапа, как и было уже отмечено выше при рассмотрении принципов построения универсальных моделей.

На первом этапе составления рассматриваемой модели выводится модель элементарного участка, описывающая нестационарный процесс.

В качестве исходной модели принята система уравнений (18) для изотермического неустановившегося движения газа в горизонтальном трубопроводе, с заменой $k=-\frac{\lambda|v|}{2d}$ она запишется так:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x}=\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+k\rho v \\ -\frac{1}{c^2}\frac{\partial p}{\partial t}=\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} \end{cases}. \tag{26}$$

Учитывая зависимость $\rho v = {Q_m}/{F}$:

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial p}{\partial x} = \dfrac{1}{F}\dfrac{\partial Q_m}{\partial t} + \dfrac{k}{F}Q_m \\ -\dfrac{\partial p}{\partial t} = \dfrac{c^2}{F}\dfrac{\partial Q_m}{\partial x} \end{cases}. \tag{27}$$

Далее используется одностороннее интегральное преобразование Лапласа:

$$F(s) = L[f(t)] = \int_0^\infty f(t)e^{-st}dt\ , \tag{28}$$

которое ставит в соответствие каждой однозначной функции $f(t)$ (оригиналу) единственную функцию $f(s)$ (изображение) комплексной переменной $s = r \pm i\infty$. После решения краевых задач в изображениях переход к оригиналам осуществляют в общем случае по формуле:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i}\int_{r-i\infty}^{r+i\infty} f(s)e^{-st}ds\ . \tag{29}$$

Преобразовывая уравнения (27) по Лапласу, и записав $\dfrac{\partial}{\partial x} = \dfrac{d}{dx}$, получим изображение в виде:

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial p(x,s)}{\partial x} = \dfrac{1}{F}\dfrac{\partial Q_m(x,s)}{\partial t} + \dfrac{k}{F}Q_m(x,s) \\ -sp(x,s) = \dfrac{c^2}{F}\dfrac{\partial Q_m(x,s)}{\partial x} \end{cases} \tag{30}$$

Опуская некоторые этапы вывода, представим готовые решения системы уравнений (27), которых в зависимости от вида граничных условий может быть шесть типов, например, два их них – это решения для нахождения давления и расхода в начале трубы по известным давлению и расходу в ее конце:

$$\begin{bmatrix} p(0,s) \\ Q_m(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\alpha l & \dfrac{1}{\alpha\beta}sh\alpha l \\ \alpha\beta \cdot sh\alpha & ch\alpha l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p(l,s) \\ Q_m(l,s) \end{bmatrix}, \tag{31}$$

или для нахождения давления и расхода в конце трубы по известным давлению и расходу в ее начале:

$$\begin{bmatrix} p(l,s) \\ Q_m(l,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\alpha l & -\frac{1}{\alpha\beta} sh\alpha l \\ -\alpha\beta \cdot sh\alpha & ch\alpha l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p(0,s) \\ Q_m(0,s) \end{bmatrix}, \tag{32}$$

где $\begin{bmatrix} p(0,s) \\ Q_m(0,s) \end{bmatrix}$ и $\begin{bmatrix} p(l,s) \\ Q_m(l,s) \end{bmatrix}$ – матрицы параметров на входе и выходе трубы; $\begin{bmatrix} ch\alpha l & \frac{1}{\alpha\beta} sh\alpha l \\ \alpha\beta \cdot sh\alpha & ch\alpha l \end{bmatrix}$ и $\begin{bmatrix} ch\alpha l & -\frac{1}{\alpha\beta} sh\alpha l \\ -\alpha\beta \cdot sh\alpha & ch\alpha l \end{bmatrix}$ – матрицы связи между параметрами на входе и выходе трубы для соответствующих видов граничных условий; $\alpha = \frac{1}{c}\sqrt{(s+k)s}$ и $\beta = \frac{c^2}{Fs}$ – коэффициенты, введенные для удобства представления.

В общем виде для всех шести видов граничных условий решение выглядит так:

$$V = S \cdot f \tag{33}$$

Члены этого уравнения соответствуют соответствующим, расположенным в том же порядке, матрицам в уравнениях (31) и (32), обобщением которых оно является.

<u>На втором этапе</u> составления рассматриваемой модели производится свертывание матриц отдельных элементарных участков сложной трубопроводной системы в общей операционной модели. Матрицы типа тех, что представлены в (31) и (32) допускают перемножение матриц элементов системы по потоку (31) и против потока (32) в трубопроводе. Так, для трубопровода, состоящего из нескольких участков, общая матрица связи может быть получена как перемножение матриц связи отдельных участков. Например, для трубопровода, состоящего из трех последовательно соединенных участков решение (48) преобразуется в следующее:

$$V = S^{L_1} S^{L_2} S^{L_3} \cdot f \ , \tag{34}$$

где L_1, L_2, L_3 – длины трех участков.

Таким образом, линейную часть трубопровода можно свести к элементу с двумя входами и двумя выходами.

Для унифицированного описания остальных основных объектов газотранспортной системы автором [9] еще представлены модели перекачивающей станции, запорно-регулирующей арматуры, утечки и закупорки трубопровода в виде матриц связи, аналогичных представленным в (31) и (32). Элементы эти матриц имеют очень простую математическую структуру ввиду применения при их выводе предельно упрощенных зависимостей параметров. Например, матрица КС, для которой приняли линейную зависимость давления от расхода $p_{вых} = mp_{вх} - f_k Q_m$, имеет вид:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -f_k^m & m \end{bmatrix}, \qquad (35)$$

Такое представление объектов дает возможность составления из них общей матрицы газотранспортной системы и последующего нахождения решения, однако ценой за эту возможность послужило слишком сильное упрощение моделей объектов.

Сведение линейной части трубопровода к элементу с двумя входами и двумя выходами, то есть к расчету только давления и расхода на обоих концах без учета изменений температуры из-за дроссель-эффекта и теплообмена с окружающей средой приведет к существенным отличиям результатов расчета по этому способу и фактических данных по режиму реально действующего газопровода.

Принятие в качестве матрицы КС выражения (35), выведенной на основе предполагаемой линейной зависимости давления от расхода не отражает реальную структурную сложность этого объекта. Так, практически регулярно используется персоналом КС изменение степени загрузки работающих ГПА, отсюда следуют более сложные зависимости давления от расхода. Вследствие осуществления сжатия, температура газа на выходе ГПА на десятки градусов отличается от температуры газа на входе, выбранный персоналом режим работы АВО газа значительно влияет на величину температуры газа на выходе КС.

Далее автором [9] описаны два способа составления на основе описанных операторов связи математической модели сложных трубопроводных систем. При первом способе применяются общая теория цепей, а элементы трубопроводных систем соединяются при помощи матриц. При втором способе элементы трубопроводных систем соединяются при помощи сигнальных графов.

К этим методам относятся все оценочные суждения, сделанные выше относительно рассмотренного метода с применением матрицы элементов сложных трубопроводных систем. Также, в этих способах не учитываются оперативные управляющие воздействия, при которых меняется топология и режим работы, например, закрытие линейного крана с отключением соответствующего участка сложного газопровода. Для этого требуется введение в модель соответствующих операторов состояния каждого участка и объекта.

Общие выводы

Было проведено рассмотрение существующих в настоящее время, как частных, так и универсальных моделей сложных газопроводов для обоих вариантов режима (стационарного и нестационарного). Оценки методов для каждой из этих групп были сделаны непосредственно при рассмотрении.

На наш взгляд, описание сложного газопровода непременно одним матричным уравнением, и для этого подгонка всех разнотипных объектов под один вид математического представления, не может быть самоцелью и не является необходимым при решении поставленной задачи.

В рассмотренных моделях не рассматривается вопрос учета оперативных управляющих воздействий.

Ограничения по возможностям существующих математических средств обуславливают неизбежные компромиссы и упрощения при создании моделей сложных газопроводов. Из-за этого все рассмотренные методы и их аналоги не обладают требуемой степенью детализации для описания реальных газопроводов.

Можно предположить три направления для поисков решения указанных проблем.

Первое направление - это разработка метода расчета сложных газопроводов с использованием достаточно детализированной стационарной модели простого газопровода, такой как рассмотренная нами модель, описанная формулами (1) – (3), приведенных из документа [8].

Для этого потребуется создание метода расчета сложных газопроводов любой топологии с учетом не только давления и расхода, но и температуры газа, для чего должен рассчитываться внутренний и внешний теплообмен.

Так же, для этого потребуется научное обоснование границ применимости стационарной модели к реальным условиям и проработка вопроса возможного ее приспособления к некоторым частным случаям нестационарных режимов.

Второе направление – это поиск оптимального способа упрощения, линеаризации уравнений нестационарной модели с привлечением опытных и экспериментальных данных.

Третье направление – это разработка моделей остальных основных объектов газотранспортной системы, например, компрессорной станции в виде отдельных расчетных модулей, обеспечивающих требуемую степень детализации, соответствующей их фактической структурной сложности и учитывающей весь спектр возможных управляющих воздействий на них.

Для получения окончательного результата требуется объединение всех трех указанных направлений в некоторой гибкой гибридной модели.

Список используемых источников

1 Вольский Э.Л., Константинова И.М. Режим работы магистрального газопровода. Л.: Недра, 1970. 168 с.

2 Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. М.: Машиностроение, 1972. 670 с.

3 Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Януш В. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. М.: Наука, 1976. 256 с.

4 Калинин А.Ф. Расчет, регулирование и оптимизация режимов работы газоперекачивающих агрегатов. М.: МПА-Пресс, 2011. 264с.

5 Калинин А.Ф. Эффективность и регулирование режимов работы систем трубопроводного транспорта природного газа. М.: МПА-Пресс, 2007. 323с.

6 Кривошеин Б.Л., Тугунов П.И. Магистральный трубопроводный транспорт (физико-технический и технико-экономический анализ). М.: Наука, 1983. 238 с.

7 Лопатин А.С. Термодинамическое обеспечение энерготехнологических задач трубопроводного транспорта природных газов. М.: изд-во «Нефтяник», 1996. 82 с.

8 Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов. СТО Газпром. М.: ОАО «Газпром», 2006. 192с.

9 Сложные трубопроводные системы/ Грачев В.В.[и др.] М.: Недра, 1982, 256 с.

10 Сухарев М. Г., Ставровский Е. Р. Оптимизация систем транспорта газа. М.: Недра, 1975. 277 с.

11 Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р., Брянских В.Е. Оптимизационное развитие систем газоснабжения. М.: Недра, 1981. 294 с.

12 Темпель Ф.Г. Технология транспорта газа. Л.: Недра, 1976. 279 с.

13 Трубопроводный транспорт нефти и газа: учебник для вузов/ Алиев Р.А. [и др.] 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1988. 368 с.: ил.

14 Теплотехнические расчеты процессов транспорта и регазификации природных газов. Справочное пособие. / Загорученко В.А.[и др.] М.: Недра, 1980. 320 с.

15 Фурман И.Я. Экономика магистрального транспорта газа. М.: Недра, 1978. 281 с.

16 Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра, 1975. 224 с.

References

1 Volsky E.L., Konstantinova I.M. Rezhim raboty magistralnogo gazoprovoda. L.: Nedra, 1970. 168 s. [in Russian].

2 Vukalovich M.P., Novikov I.I. Termodinamika. M.: Mashino-stroyeniye, 1972. 670 s. [in Russian].

3 Galitseysky B.M., Ryzhov Yu.A., Yanush V. Teplovye i gidrodinamicheskiye protsessy v koleblyushchikhsya potokakh. M.: Nauka, 1976 256 s. [in Russian].

4 Kalinin A.F. Raschet, regulirovaniye i optimizatsiya rezhimov raboty gazoperekachivayushchikh agregatov. M.: MPA-Press, 2011. 264s. [in Russian].

5 Kalinin A.F. Effektivnost i regulirovaniye rezhimov raboty sistem truboprovodnogo transporta prirodnogo gaza. M.: MPA-Press, 2007. 323s. [in Russian].

6 Krivoshein B.L., Tugunov P.I. Magistralny truboprovodny transport (fiziko-tekhnichesky i tekhniko-ekonomichesky analiz). M.: Nauka, 1983. 238 s. [in Russian].

7 Lopatin A.S. Termodinamicheskoye obespecheniye energotekhnolo-gicheskikh zadach truboprovodnogo transporta prirodnykh gazov. M.: Izd. «Neftyanik», 1996. 82 s. [in Russian].

8 Normy tekhnologicheskogo proyektirovaniya magistralnykh gazoprovodov. STO Gazprom. M.: OAO «Gazprom», 2006. 192s. [in Russian].

9 Slozhnye truboprovodnye sistemy/ Grachev V.V. [i dr.], 1982, 256 s. [in Russian].

10 Sukharev M. G., Stavrovsky Ye. R. Optimizatsiya sistem transporta gaza. M.: Nedra, 1975. 277 s. [in Russian].

11 Sukharev M.G., Stavrovsky Ye.R., Bryanskikh V.E. Optimizatsionnoye razvitiye sistem gazosnabzheniya. M.: Nedra, 1981. 294 s. [in Russian].

12 Tempel F.G. Tekhnologiya transporta gaza. L.: Nedra, 1976. 279 s.

13 Truboprovodny transport nefti i gaza: uchebnik dlya vuzov/ R.A. Aliyev [i dr.]. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Nedra, 1988. 368 s.; il. [in Russian].

14 Teplotekhnicheskiye raschety protsessov transporta i regazifikatsii prirodnykh gazov. Spravochnoye posobiye. / Zagoruchenko V.A [i dr.]. M.: Nedra, 1980. 320 s. [in Russian].

15 Furman I.Ya. Ekonomika magistralnogo transporta gaza. M.: Nedra, 1978. 281 s. [in Russian].

16 Charny I.A. Neustanovivsheyesya dvizheniye realnoy zhidkosti v trubakh. M.: Nedra, 1975. 224 s. [in Russian].

Сведения об авторе

About the author

Ванчин А.Г., главный инженер филиала ООО «Газпром трансгаз Москва» Курское ЛПУМГ, докторант кафедры термодинамики и тепловых двигателей РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. Москва. Российскаяфедерация.

A.G. Vanchin, The Chief Engineer of Branch of Open Company “Gazprom Transgas Moscow” “Kursk Department of Gas Main”, the Doctoral Candidate of Thermodynamics and Thermal Engines Chair of the Russian State University of Oil and Gas of a Name of I.M. Gubkin. Moscow, the Russian Federation

e-mail: alex_vanchin@mail.ru