



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

*Б.У.Шомирзаев*

*PhD, старший преподаватель,*

*Андижанский государственный университет,*

*E-mail: [shobabur@mail.ru](mailto:shobabur@mail.ru)*

*Аннотация.* В статье рассмотрены вопросы математического моделирования процессов магистрального транспорта природного газа, актуальность решения проблемы создания систем автоматического управления для автоматизации контроля и управления технологическими параметрами. По заключению автора, достаточным условием корректности постановки задачи по давлениям и расходам будет наличие граничных условий по давлению во всех точках.

*Ключевые слова:* газотранспортные системы, математическое моделирование, газопровод, давление, расход, трубопровод, регулирование, транспортировка газа.

В процессе эксплуатации систем газопроводов требуется принятие оптимальных решений по транспортировке газа. Как правило, как магистральные, так и распределительные газотранспортные системы (ГТС) обладают существенной избыточностью возможных маршрутов транспортировки газа. Во-первых, участки магистральных ГТС обычно имеют в своём составе несколько параллельно идущих ниток, зачастую имеющих разную технологию. При неполной загрузке участка использование всех ниток не требуется, возможно функционирование одной или нескольких ниток в режиме «на проход», то есть без включения силового оборудования. Во-вторых, как в магистральных, так и в распределительных системах возможно наличие зацикливания, что позволяет обеспечивать требуемые



величины поставок газа при различных потокораспределениях на участках системы. В обоих случаях требуется поиск оптимальных решений по потокораспределению в системе, критерии оптимальности могут варьироваться в зависимости от специфики поставленной задачи.

Предлагается использование для расчёта оптимальных режимов и оптимальной структуры систем транспорта газа методов целенаправленного перебора вариантов.

Так как многие управляющие параметры процессов управления функционированием (число активных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) в составе компрессорных станций (КС), число активных КС, число «ниток на проход») и управления развитием (диаметры труб, топология проектируемой системы) систем транспорта газа имеют дискретные области изменения, применение непрерывных методов оптимизации для решения данных задач затруднительно и может дать адекватный результат только при наличии хорошего начального приближения. Напротив, метод целенаправленного перебора вариантов не требует какого-либо начального приближения и позволяет найти глобальный экстремум целевой функции. Для его применения предлагается представление задач оптимального управления и управления развитием систем транспорта газа как многошаговых процессов, к которым и применяется метод динамического программирования.

Задачи математического моделирования процессов магистрального транспорта природного газа существенно осложняются наличием неопределённости в исходных данных. Прежде всего, недостоверно известными являются перспективные объёмы добычи и потребления газа. Второй источник недостоверности – состояние трубопроводов и силового оборудования. Зачастую для моделирования процессов транспорта газа приходится пользоваться расплывчатой информацией по состоянию и



характеристикам трубопроводов и силового оборудования. В процессе эксплуатации трубопроводов изменяются коэффициенты гидравлического сопротивления из-за образования гидратов, конденсата, отложения шлама в полости трубы. С течением времени ухудшаются прочностные характеристики трубопроводов, что приводит к снижению максимально допустимого давления газа. Адекватность моделирования режимов компрессорных станций и цехов (КЦ) зависит от достоверности информации о состоянии газоперекачивающих агрегатов, их газодинамических характеристиках, которые «салятся» в процессе эксплуатации.

Недостоверность исходных данных может быть учтена в математических моделях двумя способами – с помощью вероятностных моделей, а также методов теории нечётких множеств. Вероятностные модели исходят из предположения, что реальная реализация альтернатив зависит от случая, а численная оценка случайности может быть проведена либо по ретроспективным данным, либо путем правильно поставленного научного эксперимента, либо, наконец, в соответствии с оценками экспертов (субъективная вероятность). Аппарат нечётких множеств, напротив, не эксплуатирует понятия теории вероятностей, а направлен на выведение следствий из исходных предположений о качестве (достоверности) исходной информации.

Турбулентное течение природного газа в трубопроводе описывается следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(pv) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(pv) + \frac{\partial}{\partial x}(pv^2) + \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \sin \alpha + \frac{1}{4r} \lambda pv|v| = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( p \varepsilon^{(y\partial)} + pv \left( \frac{v^2}{2} + h^{(y\partial)} + gH \right) \right) = -\frac{2}{r} K(T - T_{OC}). \end{cases} \quad (2)$$



Здесь:

$p$  – давление в газопроводе,

$T$  – температура газа,

$\rho$  – плотность газа,

$v$  – скорость потока газа,

$x$  – текущая координата длины газопровода,

$t$  – время,

$d$  – внутренний диаметр трубы,

$\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления,

$\alpha$  – угол наклона газопровода к горизонту,

$H$  – высота от рассматриваемой точки газопровода до уровня моря,

$\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия газа,

$h$  – удельная энтальпия газа,

$g$  – ускорение свободного падения,

$T_{oc}$  – температура окружающей среды,

$K$  – коэффициент общей теплопередачи от газа в окружающую среду.

Уравнения данной системы представляют собой записанные в дифференциальной форме законы сохранения массы, импульса и энергии, в предположении о квазиодномерности течения. В зависимости от специфики решаемых задач, в том числе от требуемой точности расчёта, на практике могут применяться различные упрощения системы (1).

Одним из эффективных упрощений системы (1) являются уравнения, предложенные А.С Казаком:

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial t} = -|v| \frac{\partial Q}{\partial x} - S \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{|v|\lambda}{2D} Q - S\rho g \sin\alpha, \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{\frac{\partial \rho}{\partial p} S} \frac{\partial Q}{\partial x}, \\ \frac{\partial T}{\partial x} = D_p \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\pi K D}{c_p Q} (T_{oc} - T) - \frac{g}{c_p} \sin\alpha, \end{cases} \quad (2)$$



где  $G$  – массовый расход газа,  $S$  – площадь внутреннего поперечного сечения газопровода,  $D_p$  – коэффициент Джоуля-Томсона,  $C_p$  – изобарная теплоемкость.

Система получена в предположении о малости числа Маха – отношения скорости газа к скорости звука, данное условие в магистральных газопроводах может нарушиться только в случае возникновения утечки газа. Данная система, в отличие от системы (1), является линейной с переменными коэффициентами относительно неизвестных  $p$ ,  $G$  и  $T$ , что существенно упрощает её численное решение. В частности, возможна декомпозиция расчётной задачи на изотермический расчёт, при котором рассчитываются распределения давления и расхода газа, и расчёт распределения температуры газа.

В стационарном случае система (2) принимает вид:

$$\begin{cases} S \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{|v|\lambda}{2D} Q + S\rho g \sin\alpha, \\ \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial x} = D_p \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\pi K D}{c_p Q} (T_{0C} - T) - \frac{g}{c_p} \sin\alpha. \end{cases} \quad (3)$$

На практике зачастую оказывается, что точное распределение температуры окружающей среды является неизвестным, а температура газа от начала к концу линейного участка меняется незначительно. В этом случае может быть использовано изотермическое приближение  $T = const$ . Тогда система примет вид:

$$\begin{cases} S \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{|v|\lambda}{2D} Q + S\rho g \sin\alpha. \\ \frac{\partial Q}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

в этом случае для определения значения плотности по уравнению состояния необходимо задать среднюю температуру газа по линейному участку.



Для системы (1) в стационарном случае и системы (4) возможны следующие постановки расчётной задачи:

1. На входе и выходе трубопровода задаются значения давления, на входе или на выходе – температура газа;

2. Задаётся массовый расход газа по трубопроводу, давление на входе трубопровода, температура газа на входе или выходе. Следует отметить, что данная постановка не всегда является корректной, поскольку заданного давления на входе в систему может быть недостаточно для обеспечения заданного расхода газа;

3. Задаётся массовый расход газа по трубопроводу, давление на выходе трубопровода, температура газа на входе или выходе.

Для системы (3) вместо температуры газа на входе или выходе трубопровода требуется задавать значение средней температуры газа, в остальном постановки задачи являются аналогичными. Основным достоинством изотермической модели является ее простота реализации, в то же время она дает вполне точные предсказания для распределения давления по длине газопровода для установившихся режимов работы. Однако для её использования необходимо задание средней температуры газа.

Под расчётом режима функционирования ГТС понимается определение параметров потока в любой точке системы при заданной структуре системы, граничных условиях и управляющих воздействиях. Неизвестными параметрами являются давление и расход газа, а также его температура и состав. Зачастую изменением температуры и состава газа можно пренебречь, в этом случае неизвестными являются только давление и расход, а средняя температура и состав газа должны быть заданы.



Для выполнения условия детерминированности параметров газа по графу необходимо, чтобы количество заданных входных или выходных значений давления и расхода было равно количеству входов и выходов системы, причём необходимо наличие хотя бы одного граничного условия по давлению. Количество граничных условий по температуре и составу газа может различаться в зависимости от направлений потока в графе. Достаточным условием детерминированности по температуре и составу является задание этих величин во всех точках, где газ поступает в систему.

Однако, при сложной структуре ГТС и отсутствии априорной информации о потокораспределении, даже в стационарном случае точки поступления газа в систему могут быть заранее неизвестны и, соответственно, решение вопроса о корректности поставленной задаче будет нетривиальным. На практике, в таких ситуациях как правило задаётся избыточная информация по температуре и составу газа в каждой точке системы, где поступление газа в принципе возможно.

Вопрос корректности поставленной задачи стационарного изотермического расчёта с постоянным составом газа также может являться нетривиальным. В случае отдельного линейного участка некорректным может оказаться расчёт при заданном расходе и давлении на входе в систему, если для прохождения данного расхода оказывается недостаточно даже нулевого давления на выходе газопровода. Аналогичная ситуация может возникать и в системе трубопроводов, поэтому достаточным условием корректности постановки задачи по давлениям и расходам будет наличие граничных условий по давлению во всех точках, в которых газ вытекает из системы. Так как, опять же, направление потока газа может быть заранее неизвестно, заведомо корректной комбинацией граничных условий будет расход или давление на одном входе и давления на всех остальных входах и выходах.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулик В.С. Оптимизация режимов транспортировки природного газа по системам магистральных газопроводов в условиях неопределённости исходных данных: Диссертация кандидата технических наук: 05-13-18. – М., 2015
2. Сиддиков И.Х., Шомирзаев Б. У. Создание динамических моделей технологических процессов для подземных хранилищ газа // Вестник ТашГТУ. Ташкент, – №1. – 2019, – С.9-13.
3. В. В. Крюков, В. В. Тугов Управление редуцированием газа в магистральных газопроводах высокого давления с применением аппарата нечеткой логики- Известия высших учебных заведений. Поволжский регион 2019-№1-С.55-655.
4. Siddikov I.X., Shomirzaev B. U. Gas Pressure and Flow Control Algorithm in Main Gas Pipelines Using the Fuzzy Logic Apparatus // International journal of advanced research in science, Engineering and technology. India 2019, Vol. 6, Issue 8, August 2019.
5. Кулиев А. М., Тагиев В. Г. Оптимизация процессов газопромысловой технологии. М.: Недра, 1984.