

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

УДК 622.691.4:004.023

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТОВАРНО-ТРАНСПОРТНОЙ РАБОТЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА В РАМКАХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА

*канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ; Т.М. ГЛУХОВА;
А.П. АНДРИЕВСКИЙ; А.Н. ЯНУШОНОК
(Полоцкий государственный университет)*

Предложен алгоритм расчета товарно-транспортной работы магистральной газотранспортной системы, опирающийся на формализм модели неизотермической стационарной транспортировки газа и структуры данных, построенной нами для решения задачи расчета запаса газа на магистральном газопроводе. Показано, как учитывается работа реверсных участков газопровода, связанных с подземными хранилищами газа.

Ключевые слова: магистральная газотранспортная система, транспортировка газа, товарно-транспортная работа, алгоритм расчета.

Автоматизация производственных процессов в сфере трубопроводного транспорта создает условия для оптимизации процесса транспортировки газа потребителю по критерию минимизации энергетических затрат. Современные тенденции в управлении потоками энергоносителей постулируют переход от управления потоками газа к управлению запасами газа, что концептуально меняет подходы по планированию работы газотранспортных предприятий и режимов работы энергетических установок. Для решения задачи управления необходим точный инструмент, позволяющий обеспечить требования коммерческого учета запаса газа, а также позволяющий с учетом новых концептуальных подходов решить задачу расчета товарно-транспортной работы (ТТР) газотранспортной системы.

Сформулированная практическая задача расчета ТТР ставит перед нами научную проблему построения расчетной модели газотранспортной системы, анализа особенностей данной расчетной модели и разработки алгоритмов оптимизации и решения соответствующей расчетной системы нелинейных уравнений для определения гидравлической и термической ситуации, а также построения алгоритма расчета ТТР в рамках сформированных структур данных.

В силу действия целого ряда факторов расчетная модель газотранспортной системы обладает неопределенностью и требует разработки эффективного итерационного алгоритма поиска решения и разработки эвристик для разрешения «ошибок» модели в реальном времени.

Расчет товарно-транспортной работы магистрального газопровода является необходимой и важной составляющей для тарификации потребителей. Кроме этого, ТТР может выступать целевой функцией для оптимального управления потоками транспортировки газа. Учитывая, что нами начиная с 2010 года ведется работа по созданию эффективных методов моделирования неизотермического стационарного процесса транспортировки газа, который дает исчерпывающую картину температурного и гидравлического состояния сети, на основе разработанных моделей и методов расчета можно построить систему расчета ТТР для каждого стационарного состояния сети транспортировки [1–3].

Постановка задачи расчета температурной и гидравлической ситуации была представлена системами нелинейных уравнений – математической моделью стационарного и неизотермического движения газа в системах газотранспортных обществ Республики Беларусь. Размерность системы в зависимости от масштаба моделируемого участка схемы варьируется от фрагмента газотранспортной системы (ГТС) до масштаба газотранспортной системы Республики Беларусь ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» [1].

Задача расчета ТТР является актуальной, в первую очередь, для диспетчерского управления газотранспортных предприятий. Диспетчеризация обеспечивает согласованную работу различных звеньев управляемого объекта в целях повышения технико-экономических показателей и лучшего использования производственных мощностей. Эта проблема является следствием решения более общей задачи – задачи определения режимов транспорта газа по газотранспортной системе при целом ряде определенных критериев.

Проблема автоматизации контроля и управления описанными процессами представляет собой многофакторную задачу. Специфика решаемой задачи состоит в наличии, как правило, сложных нелинейных трансцендентных зависимостей между параметрами ГТС, а их большое количество требует выполнения большого объема вычислений за ограниченное время.

На современном этапе разработка и оптимизация алгоритмов, учитывающих особенности таких систем в моделях сетей транспортировки газа, имеет большое научное и практическое значение. Исследования в данном направлении приводят к формулировкам новых подходов и методик, экономический эффект от применения которых заключается в увеличении скорости работы и принятии решений диспетчерами транспортных управлений, в повышении точности и оперативности вычисляемых параметров, характеризующих режимы транспорта газа, что, в свою очередь, позволяет экономить денежные ресурсы предприятий. Примером такой ситуации может выступать необходимость корректного определения запаса газа, находящегося на участке магистрального газопровода перед его стравливанием при проведении ремонтных работ или с целью прогнозирования необходимого запаса газа в определенном фрагменте магистрального газопровода для удовлетворения нужд потребителей на заданный период.

Формализация задачи расчета товарно-транспортной работы

Для представления информации о расчетной модели трубопроводной газотранспортной сети будем применять предложенную нами ранее формализацию газотранспортной системы в виде сети с изменяющейся во времени топологии. Для описания формализма будем придерживаться объектно-ориентированной парадигмы в постановке Гради Буча [4], когда для обращения к внутренней структуре вводимых сущностей изображается, используя оператор «.», обозначение вида $a.b$ выражает обращение к свойству b элемента a .

Выделим классы концептуальных сущностей, описывающие элементы газотранспортной системы.

Узел $n = \{p_i\}$ – представление точечного элемента газотранспортной сети, хранящего данные p_i о давлении и температуре газа, характеристику узла (входной/выходной узел) и другие свойства.

Множество всех узлов $N = \{n_i\}$.

$l = \{n_1, n_2, p_1, p_2, \dots\}$ – фрагмент трубопровода, включающий пару узлов n_1 и n_2 , и свойства p_i фрагмента (длина, диаметр, толщина стенки, глубина залегания и др.).

Множество всех фрагментов трубопровода (далее – линков) обозначим как $L = \{l_k\}$.

Множество линков, объединенных по тому свойству, что в них входит в качестве одной из вершин узел n , будем задавать так: $L(n) = \{l_i / l.n_1 = n \vee l.n_2 = n\}$.

Для удобства дальнейших рассуждений введем также оператор, выделяющий множество узлов, содержащееся в линках $L(n)$ узла n : $NI(n) = \{n_i / \exists l \in L(n), l.n_1 = n_i \vee l.n_2 = n_i\}$.

Определим структуру данных для хранения модели в следующем виде: $LM = \{L(n_i) / \forall n_i \in N\}$.

С точки зрения реализации в рамках объектно-ассоциативного языка программирования такая структура является ассоциативным контейнером типа хеш-таблицы или контейнера, основанного на построении дерева поиска; вычислительная сложность операций добавления, удаления, поиска элемента для любых типов ассоциативных контейнеров оценивается как $O(\log n)$, где n – количество пар элементов в контейнере [5].

Фактически это представление ориентированного графа $G(N, L)$, описывающего газотранспортную сеть. Одной из особенностей задачи является то, что топология сети меняется в реальном времени. Изменение состояния задвижек и регуляторов приводит к перекоммутации сети. Меняются множества входных и выходных узлов, а также есть узлы, которые могут играть роль как входных, так и выходных узлов сети (например, узлы, представляющие входы в подземные хранилища газа (ПХГ)).

Введем еще несколько удобных ассоциативных контейнеров, которые будем использовать в алгоритмах оптимизации модели.

Контейнер признака присутствия $F(n)$, который хранит соответствие объекту, помещенному в контейнер, значению флага $true/false$, или 1/0. Тогда запись вида $n \in F$ будем интерпретировать, как то, что в ассоциативном контейнере признака F объекту n поставлено в соответствие значение флага, равное 1. Такая запись интуитивно понятна и удобна для использования в силу имеющейся аналогии с ассоциативными контейнерами языка программирования высокого уровня (C++, java, C#).

Таким образом, можно выделить следующие особенности расчетной модели:

- 1) топология сети меняется в реальном времени;
- 2) меняются множества входных и выходных узлов;
- 3) присутствуют пограничные узлы, характер которых определяется расчетным путем.

В соответствии с действующими нормативно-правовыми документами Республики Беларусь товарно-транспортная работа газотранспортной сети есть произведение объема прокаченного газа на расстояние за определенный период времени [6; 7].

Поскольку топология расчетной схемы меняется во времени, то суммарная ТТР будет представлять собой сумму ТТР для каждого интервала времени, на котором сеть транспортировки стационарна.

Для каждого выходного узла сети (ГРС – газораспределительная станция; ГИС – газоизмерительная станция), моделирующего потребителя газа, а также для узлов с возможностью реверсного движения газа, таких как ПХГ, в ситуации стационарного процесса необходимо найти путь транспортировки газа от входного узла. Для каждого выходного узла данный путь определяется в линейно-связанном, огра-

ниченном пространстве. Данное пространство будет включать в себя все инварианты путей, и критерием выбора пути принимаем минимальность длины пути.

Множество узлов, для которых необходимо рассчитать ТТР, обозначим через N_{TTR} . Оно является подмножеством множества всех узлов модели $N_{TTR} \subset N$.

Множество входных узлов, до которых необходимо определить кратчайший путь, обозначим как N_{in} . Множества N_{in} и N_{TTR} не пересекаются, поскольку узлы, моделирующие ПХГ, выступающие в качестве источников газа, исключаются из множества N_{TTR} .

Достижимость входного узла n_i от узла n_j в рамках модели LM с учетом направления движения газа будем обозначать оператором $reached(n_j, n_i)$.

Для решения задачи расчета товарно-транспортной работы магистрального газопровода в рамках модели LM определим для каждого узла $n_j \in N_{TTR}$ множество достижимых входных узлов. Для этого введем оператор $IN(n_j) = \{n_i \in N_{in} \mid reached(n_j, n_i)\}$.

Для удобства дальнейших рассуждений введем также оператор, выделяющий множество узлов, содержащееся в линиях $L(n)$ узла n с учетом направления расхода газа Q :

$$N_{TTR}(n) = \{n_i \mid \exists l \in L(n), l.n_1 = n_i \vee l.n_2 = n_i, l.Q < 0\}.$$

Но даже для двух достижимых узлов может быть множество путей достижения, которые в рамках модели LM будут представлять собой цепочку связанных линков. Для решения этой задачи можно воспользоваться алгоритмом Дейкстры в ограниченном множестве достижимых узлов в пространстве поиска, для которого в качестве весов выступают длины линков.

Сложность алгоритма Дейкстры обычно определяют как $O(n^2 + m)$ [8].

Алгоритм поиска компонентов связности в ориентированном графе

Данный алгоритм похож на разработанный нами ранее [9] алгоритм поиска фрагментов баллонов, но с тем отличием, что при обходе графа учитывается направление расходов. Это обеспечивается применением оператора N_{TTR} .

1. Зададим множество групп связанных узлов $G = \{G_1, G_2, \dots, G_k\}$ и положим $k = 1$.
2. Организуем выбор узла, который отсутствует в группах связанных узлов: $n \in N \mid n \notin G_i \forall G_i \in G$. Если такой узел отсутствует, то переходим к шагу 10. Для обработки найденного узла перейдем к шагу 3.
3. Ведем контейнеры флагов для обработки узла n :

$F_{current}(n)$ – узлы связанной группы, достижимые из узла n , ассоциированы со значением флага, равным 1;

$F_{new}(n_i)$ – узлы связанной группы, достижимые от рассматриваемого узла n_i за 1 шаг (с длиной пути в 1 линк), ассоциированы со значением флага, равным 1.

4. $F_{current}(n) = 1, F_{new}(n_p) = \{\}$.

5. $\forall n \in F_{current}$.

6. $\forall n_p \in N_{TTR}(n)$, если $n_p \notin G_k$ и $n_p \notin F_{current}(n)$, то $F_{new}(n_p) = 1$.

7. Если $F_{new}(n_p) = \{\}$, то переходим к шагу 9.

8. $G_k = G_k \cup F_{current}, F_{current} = F_{new}, F_{new} = \{\}$ и перейти к шагу 5.

9. $G_k = G_k \cup F_{current}, k = k + 1$, и переходим к шагу 2.

10. Выход.

Алгоритм расчета товарно-транспортной работы

1. Выполняется алгоритм поиска компонентов связности в ориентированном графе модели LM .
2. Для каждой компоненты G_i строятся множества N_{TTR} и N_{in} .
3. Для каждого узла n из N_{TTR} выполняется алгоритм Дейкстры поиска кратчайшего пути до узлов из множества N_{in} и выбирается кратчайший.
4. Рассчитывается ТТР как произведение длины кратчайшего пути на расход в узле n .
5. Формируется соответствующая запись в журнал ТТР.
6. Выход.

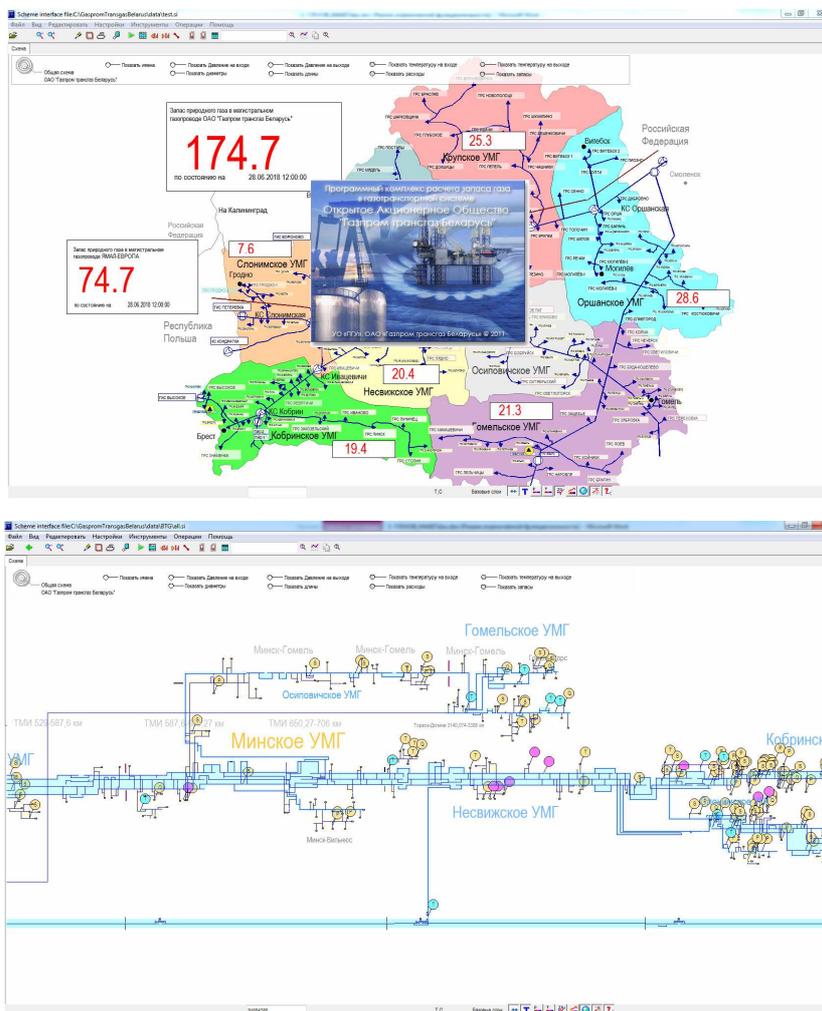
Нерешенные задачи

1. Основной нерешенной задачей расчета ТТР является учет товарно-транспортной работы, выполняемой в нестационарных процессах. В целом ряде российских и зарубежных публикаций отмечается, что решения неизотермической нестационарной задачи может отличаться до 5% от решения, полученного по стационарной модели. Основное следствие этого факта – при образовании баллона, из которого потребители продолжают «разбирать» газ, товарно-транспортная работа по закачке этого избыточного давления в баллон не рассчитывается. Данная товарно-транспортная работа была выполнена ранее как нестационарный процесс, когда поступление газа в область баллона превышало потребление газа. Решением данной проблемы может быть такой подход к расчету ТТР для потребителей газа из баллона, когда мы запоминаем последний кратчайший путь для каждого потребителя и продолжаем считать ТТР от ближайшего источника.

2. Другим несоответствием данного алгоритма расчета ТТР и принятой ОАО «Газпром» методики расчета, на наш взгляд, является выбор единственного источника по принципу кратчайшего пути. Смешивание газа от разных источников при его транспортировке, которое вычисляем в разработанном нами программном комплексе расчета запаса газа, позволяет рассчитать ТТР как сумму ТТР от разных источников с учетом процента влияния каждого. Однако для национальной системы транспортировки газа эта особенность не является критической, поскольку основная ТТР осуществляется по протяженной магистральной линии.

Выводы

1. В работе предложен алгоритм расчета товарно-транспортной работы, соответствующий нормативным документам, действующим на территории Республики Беларусь и Российской Федерации [6; 7; 10].
2. Проанализированы проблемные вопросы расчета товарно-транспортной работы по данному алгоритму.
3. Сформулированы предложения для разрешения данных вопросов.
4. Разработанный алгоритм нашел свое воплощение в рамках программного комплекса расчета запаса газа на магистральном газопроводе ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». Главное окно программы представлено на рисунке.



Главное окно программы расчета запаса газа на магистральном газопроводе ОАО «Газпром трансгаз Беларусь»

Данный программный комплекс разработан Полоцким государственным университетом в 2010 году. С 2012 года находится в промышленной эксплуатации в ОАО «Газпром трансгаз Беларусь».

ЛИТЕРАТУРА

1. Глухов, Д.О. Комбинированный алгоритм решения системы нелинейных уравнений газодинамической задачи для сетей транспортировки газа / Д.О. Глухов, А.Ф. Оськин, С.А. Авилкин // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2011. – С. 8–14.

2. Глухов, Д.О. Комбинированный алгоритм решения системы нелинейных уравнений газодинамической задачи для сетей транспортировки газа с использованием локальных эвристик / Д.О. Глухов, С.А. Авилкин // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2011. – № 12. – С. 9–15.
3. Программный комплекс расчета запаса газа в газотранспортной системе ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». Опыт эксплуатации / Д.О. Глухов // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта : сб. тез. VIII междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 25–28 нояб. 2014 г., ; редкол.: В.К. Липский [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 2014. – С. 143–144.
4. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений (UML 2) / Гради Буч [и др.]. – Третье издание = Object-Oriented Analysis and Design with Applications (3rd Edition). –М. : Вильямс, 2010. – 720 с.
5. Ахо, А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. – М. : Мир, 1979. – 536 с.
6. Богоненко, В.А. Правовое регулирование доставки газа магистральными трубопроводами / В.А. Богоненко. – Минск : Технопринт, 2004. – 216 с.
7. Борис, А. Как платить за транспортировку газа. О методических подходах к построению системы тарификации для магистральных газопроводов / А. Борис, А. Гладков, Д. Петров // Нефть и Капитал. – 2005. – № 4.
8. Алексеев, В.Е. Графы. Модели вычислений. Структуры данных / В.Е. Алексеев, В.А. Таланов. – Н. Новгород : Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2005. – 308 с.
9. Глухов, Д.О. Алгоритмы оптимизации модели сети транспортировки большой размерности в задачах расчета запаса газа / Д.О. Глухов, Т.М. Глухова // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2016. – № 12. – С. 2.
10. Методика оценки энергоэффективности газотранспортных объектов и систем : СТО Газпром 2-3.5-113-2007.

Поступила 12.06.2018

**THE ALGORITHM OF CALCULATION OF THE COMMODITY-TRANSPORT WORK
THE MAIN GAS PIPELINE IN THE FRAMEWORK
OF NON-ISOTHERMAL STEAD**

***D. GLUKHOV, T. GLUKHOVA,
A. ANDRIEVSKY, A. YANUSHONOK***

An algorithm for calculating the commodity-transport operation of the main gas transmission system is proposed. The proposed algorithm is based on the formalism of the model of non-isothermal stationary gas transportation and data structures that we constructed to solve the problem of calculating the gas reserve on the main gas pipeline. The work of reverse sections of the gas pipeline connected with underground gas storage facilities is shown.

Keywords: *main gas transportation system, gas transportation, commodity-transport work, calculation algorithm.*