УДК 621.64:004.21

МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В АЛГОРИТМАХ ПОИСКА РЕШЕНИЙ СТАЦИОНАРНЫХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА

канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ;
Т.М. ГЛУХОВА; канд. техн. наук, доц. Р.П. БОГУШ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается оптимизация режимов транспортировки газа с точки зрения минимизации энергетических затрат, в первую очередь связанная с современными потребностями трубопроводной отрасли. Важным компонентом данной задачи выступает решение гидравлической и термической задач по результатам математического моделирования. Предлагается метод получения первого приближения распределения давлений по сети транспортировки газа, обеспечивающий сокращение времени итерационного процесса поиска решения.

Ключевые слова: *транспортировка газа, энергетические затраты, минимизация, математическое моделирование, гидравлическая и термическая задачи, распределение давлений.*

Авторским коллективом начиная с 2010 года ведется работа по созданию эффективных методов расчета [3–5]. Постановка задачи представлена системами нелинейных уравнений – математической моделью стационарного и неизотермического движения газа в системах газотранспортных обществ (ГТО) Республики Беларусь. Размерность системы зависит от масштаба моделируемого участка схемы и варьируется от фрагмента газотранспортной системы (ГТС) до масштаба газотранспортной системы Беларуси в целом [3].

Однако разработанные итерационные алгоритмы расчета не позволяют говорить о возможности перехода к решению данных задач в рамках нестационарной модели. Длительное время расчета полной схемы магистрального газопровода Республики Беларусь указывает на невозможность его выполнения в реальном времени.

С целью повышения скорости сходимости алгоритмов расчета нами предлагается *метод получения первого приближения, основанный на мягких вычислениях*. Как показали численные эксперименты, предложенная аппроксимация распределения давлений дает существенное (более чем в 2 раза) сокращение времени итерационного поиска решения.

Формализация задачи описания магистральной газотранспортной сети

Для представления информации о расчетной модели трубопроводной газотранспортной сети будем придерживаться объектно-ориентированной парадигмы в постановке Гради Буча [1].

Обращение к внутренней структуре вводимых сущностей будем изображать, используя оператор «.». Тогда обозначение вида $a.b$ будет обозначать 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 $N = \{n_i\}$;
- фрагмент трубопровода $l = \{n_1, n_2, p_1, p_2, \ldots\}$, включающий пару узлов n_1 и n_2 и свойства p_i фрагмента (длина, диаметр, объем, толщина стенки, глубина залегания и др.).

Например, обращение к объему фрагмента трубопровода будет выглядеть как $l.V$.

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

Множество линков, объединенных по тому свойству, что в них входит в качестве одной из вершин узел n, будем задавать так:

$$L(n) = \{l_i \mid l.n_1 = n \vee l.n_2 = n\}.$$

Для удобства дальнейших рассуждений введем также оператор, выделяющий множество узлов, содержащееся в линках $L(n)$ узла n:

$$Nl(n) = \{n_i \mid \exists\, l \in L(n), l.n_1 = n_i \vee l.n_2 = n_i\}.$$

Определим структуру данных для хранения модели в следующем виде:

$$LM = \{L(n_i) \mid \forall n_i \in N\}.$$

С точки зрения реализации в рамках объектно-ассоциативного языка программирования такая структура является ассоциативным контейнером типа шех-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 [9].

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

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.

Введем еще несколько удобных ассоциативных контейнеров.

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#).

В данной работе в качестве универсального адаптивного аппроксиматора предлагается использовать аппарат специфической реализации нечеткой логики, разработанной в 1998 году в рамках диссертационного исследования Д.О. Глухова и получившей дальнейшее развитие в работах авторов данной публикации [2; 3; 5–8]. Адаптивность предложенной реализации заключается в возможности настройки параметров функций принадлежности под условия конкретного объекта аппроксимации.

Введем оператор определения расстояния между узлами как $L(n_1, n_2)$.

Продолжая аналогию с продукционной системой, знание об известном давлении распространяется на окружающие фрагменты в соответствии с унимодальной функцией принадлежности, имеющей максимум в заданной точке. Нами предлагается функция принадлежности в пространстве расстояний от узла аппроксимации n_i до точки n вида

$$L(n, n_i) < L_{limit}.$$

Значение искомого параметра, например давления P, в неизвестной точке n будет определяться дефаззификацией методом центра тяжести при рассмотрении полученных единиц влияния (валидных правил) как синглетонов, а именно:

$$n.P = \frac{\sum_i \varphi(n, n_i) n_i \cdot P}{\sum_i \varphi(n, n_i)}. \tag{1}$$

В нечеткой логике Бозе логические операции И и ИЛИ реализуются в виде операций взятия минимума и максимума соответственно. Поэтому вывод о значении неизвестного параметра строится, как говорят, по минимаксному принципу. Если предикат представляет собой условие в пространстве расстояний между узлом с неизвестным давлением n и узлом аппроксимации n_i, а пространство неизвестного параметра (например, давления P), то вывод методом центра тяжести будет выглядеть следующим образом:

$$n.P = \frac{\int \max(\varphi(n, n_i)) P dz}{\int \max(\varphi(n, n_i)) dz}. \tag{2}$$

В контексте рассматриваемой задачи оператор L допускает различные реализации. Мы предлагаем для реализации данного оператора как метрики расстояния между двумя связанными вершинами в графе воспользоваться алгоритмом поиска компонент связности. Этот алгоритм должен быть выполнен для каждой вершины графа G с известным по телеметрическим данным давлением n_p.

Пусть контейнер признака доступности узла в рамках запущенного алгоритма поиска компонент связности от узла n_p FNP.

Поскольку при определении каждого последующего (i-го) компонента связности узлы предыдущего компонента связности n_k будут уже иметь вычисленные значения оператора $L(n_p, n_k)$, оператор $L(n_p, n_x)$ для узла n_x нового компонента связности будет определен на основе уже вычисленного оператора и значения объема фрагмента трубопровода:

$$L(n_p, n_x) = L(n_p, n_k) + l.V^m \mid l.n_1 = n_k,\ l.n_2 = n_x, \tag{3}$$

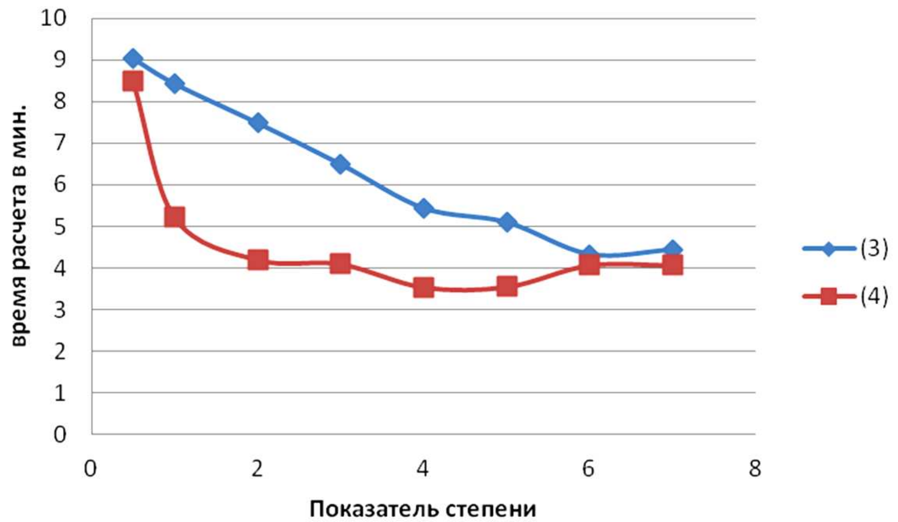
где m – показатель степени.

Единственной модификацией алгоритма поиска компонент связности будет то, что при проверке доступности узла по контейнеру признака FNP, если узел уже пройден алгоритмом, но значение оператора L, определенное на основе оператора L этого узла, меньше текущего вычисленного значения оператора L, то оно принимается как значение оператора L рассматриваемого узла.

Нами рассмотрена также вторая реализация оператора L в виде произведения:

$$L(n_p, n_x) = L(n_p, n_k)\, l.V^m \mid l.n_1 = n_k,\, l.n_2 = n_x. \qquad (4)$$

Результаты сравнительного анализа влияния полученного первого приближения на скорость сходимости (время расчета до момента достижения пороговой невязки системы) приведены на рисунке.



Сравнение реализаций оператора *L* (3) и (4)
с различными показателями степени *m*

Заключение

Предложенный метод получения первого приближения решения стационарной неизотермической задачи транспортировки газа на основе нечеткого логического аппроксиматора обладает возможностью параметрической настройки, позволяющей сократить время итерационного алгоритма поиска точного решения. Численные эксперименты показали возможность сокращения времени итерационного процесса поиска точного решения на 60%. Применение мягких вычислений позволяет получать аппроксимации сложных поверхностей, имеющие возможность настройки в определенных пределах на особенности конкретной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений (UML 2) / Гради Буч [и др.]. – 3-е изд. = Object-Oriented Analysis and Design with Applications (3rd Edition). – М. : Вильямс, 2010. – 720 с.
2. Trofimov, V. Algorithm of ecological monitoring by fuzzy production rules / V. Trofimov, A. Gloukhov, D. Gloukhov. – 2-nd International Conference Ecology and Society's Development Abstracts. – St.P. : МАНЭБ, 1997. – P. 166.
3. 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. Серия, С. Фундаментальные науки. – 2011. – № 4. – С. 8–14.
4. 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. Серия, С. Фундаментальные науки. – 2011. – № 12. – С. 9–15.
5. Программный комплекс расчета запаса газа в газотранспортной системе ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». Опыт эксплуатации / Д.О. Глухов [и др.] // 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.

6. Glukhov, D. Dynamic expert system by fuzzy inference rules to automations an examination of complex objects / Dmitry Glukhov // Budownictwo i Inzynieria Srodowiska. – Zielonogorsk : Politechnika Zielonogorska, 1998. – P. 105–109.
7. Глухов, Д.О. Применение унимодальных функций принадлежности в нечетких продукционных системах для решения задач интеллектуального управления динамическими процессами / Д.О. Глухов, А.П. Кастрюк, Т.М. Глухова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, С. Фундаментальные науки. – 2009. – № 3. – С. 115–119.
8. Глухов, Д.О. Мягкие вычисления для организации компьютерного представления номограмм на примере вычисления предельного коэффициента ползучести / Д.О. Глухов, Т.М. Глухова, С.П. Кундас // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2010. – № 3. – С. 2–6.
9. Ахо, А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. – М. : Мир, 1979. – 536 с.
10. Driankov, D. An introduction to fuzzy control / D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank. – Germany : Springer-verlag, 1993.

Поступила 07.06.2017

SOFT CALCULATIONS FOR THE DETERMINATION OF THE FIRST APPROXIMATION IN ALGORITHMS OF SEARCHING FOR DECISIONS OF STATIONARY NEOSOTHERMAL GAS TRANSPORT TASKS

D. GLUKHOV, T. GLUKHOVA, R. BOGUSH

The optimization of gas transportation modes is considered from the viewpoint of minimizing energy costs, primarily related to the current needs of the pipeline industry. An important component of this problem is the solution of the hydraulic and thermal problems based on the results of mathematical modeling. A method is proposed for obtaining the first approximation of the distribution of pressures through the gas transportation network, which ensures a shortening of the iterative process of finding a solution.

Keywords: *gas transport energy cost minimization, mathematical modeling, hydraulic and thermal tasks, the distribution of pressure.*