

УДК 681.3

**СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНОГО  
ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА В ЗАДАЧАХ АСУ ТП:  
ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ  
ДЛЯ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА**

**А.А. Китов<sup>1</sup>, В.К. Тянь<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> АО «Транснефть – Прикамье»  
420061, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Н. Ершова, 26а

<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: V\_K\_Tyuan@mail.ru.

*Приводится методика практического применения теории графов при структурном математическом моделировании сложных технологических объектов магистрального трубопроводного транспорта. Необходимость применения теории графов обусловлена большим количеством возможных подключений трубопроводов между его субъектами (задвижки, насосные агрегаты, резервуары), что усложняет оперативное решение актуальной задачи определения угрозы перекрытия потоков. Применение математических моделей позволит реализовывать алгоритмическую обработку информационных потоков и управление технологическими процессами.*

**Ключевые слова:** теория графов, автоматические системы, автоматизированные системы, базы данных, дискретная математика, структурное математическое моделирование, технологические объекты трубопроводного транспорта.

Предупреждение аварийных ситуаций возможно при своевременном реагировании и принятии адекватных решений оперативным персоналом. Качество работы операторов НППС, операторов товарных, диспетчеров РДП во многом определяется оснащенностью рабочего места правильно подобранным комплексом программного обеспечения.

В соответствии с требованиями компании АК «Транснефть» [1] система автоматизации нефтеперекачивающей станции (НПС) должна контролировать наличие открытого пути для прокачки нефти/нефтепродукта на работающей НПС.

На данный момент существуют сложные технологии перекачки с возможностью многовариантных подключений входящих и выходящих магистральных трубопроводов между резервуарными парками, НПС, расположенных на одной технологической площадке. На таких объектах оперативно детерминировать все возможные подключения между источниками и приемниками потоков в зависимости от состояния запорной арматуры является сложной и актуальной задачей.

Ранее программное обеспечение разрабатывалось по принципу «код управляет данными». Со временем данные усложнялись все больше и больше, появились структуры данных, базы данных, базы знаний и семантические сети.

Создание алгоритмов, управляющих такими данными, потребовало изменить

---

*Антон Александрович Китов, аспирант.*

*Владимир Константинович Тянь (д.т.н.), заведующий кафедрой «Трубопроводный транспорт».*

принцип «код управляет данными». Современное программное обеспечение ориентируется на принцип «данные управляют кодом». Таким образом, для решения ряда важных задач трубопроводного транспорта, связанных с безопасной их эксплуатацией, необходимо представить технологический процесс перекачки в виде данных, удобных для их алгоритмической обработки.

### **1. Моделирование технологических трубопроводов для обработки в промышленных контроллерах**

В представленной работе рассмотрены вопросы моделирования сложных технологических структур трубопроводного транспорта с целью последующей алгоритмической обработки информационных потоков и управления технологическими процессами. Адекватным аппаратом моделирования структуры технологических трубопроводов (гидравлической сети) и его объектов является теория графов [2].

С помощью ориентированного графа [3] можно ограниченным количеством правил описать модель субъектов трубопроводного транспорта, которыми являются задвижка, насосный агрегат, резервуар, приборы измерения физических величин. Каждый из перечисленных субъектов управления определяет тип вершины и специфичные данному типу свойства: положение штока задвижки, уровень жидкости в резервуаре, показания средств измерения, состояние агрегата.

Дугами графа адекватно представимы трубопроводы с характерными им свойствами (параметрами) – допустимым давлением, диаметром трубы, длиной.

Так как граф полностью определяется его смежностями или его инцидентиями, информацию о графе для обработки в ЭВМ удобно представлять в матричной форме [3].

Такой подход к организации данных дает довольно гибкий инструментарий для реализации следующих алгоритмов:

- визуализация потоков нефти;
- определение угрозы перекрытия потоков, определение подключенных входных коллекторов к резервуарам, резервуаров к подпорным насосным агрегатам, подпорных насосных агрегатов к магистральным насосным станциям, магистральных насосных станций к узлу подключения станции к магистральному трубопроводу;
- оперативное определение запертых участков трубопроводов.

Рассмотрим фрагмент следующей технологической схемы (рис. 1).

Применив правила описания технологической схемы в виде графа, получаем следующий граф объекта (рис. 2).

На этом рисунке вершины с наименованиями R34, R35, R36 представляют собой резервуары РВСП-20000 с номерами 34, 35, 36 на технологической схеме объекта (см. рис. 1) соответственно. Свойствами данных вершин являются: тип вершины (резервуар), привязка к реальному резервуару и уровень взлива в данном резервуаре.

Номера вершин с литерой Z представляют собой задвижки с их соответствующими номерами (см. рис. 1). Свойствами данных вершин являются тип вершины (задвижка), соответствие реальной задвижке, а также положение данной задвижки (открыта, закрыта, открывается, закрывается, промежуточное положение) и ее состояние (рабочее или аварийное).

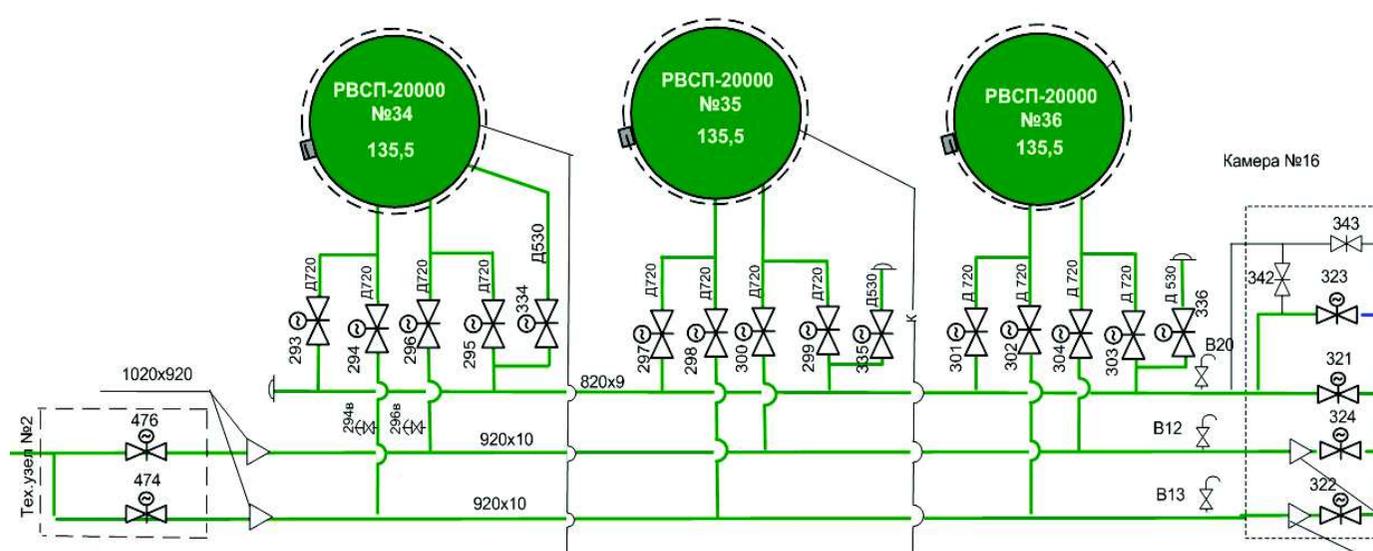


Рис. 1. Фрагмент технологической схемы резервуарного парка

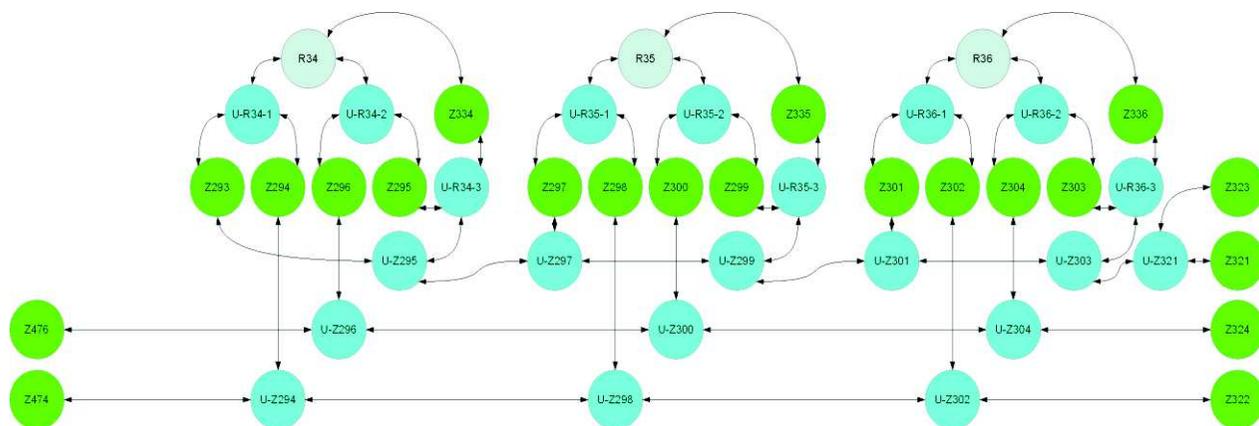


Рис. 2. Граф фрагмента технологической схемы резервуарного парка

Свойства вершины типа «задвижка» (положение и состояние) в зависимости от задач определяют процесс инициализации матрицы смежности для последующих вычислений (синтез матрицы смежности см. ниже).

Данный граф является ориентированным, что дает возможность представления обратных клапанов технологических трубопроводов.

Вершины, начинающиеся с литеры U, представляют собой технологические трубопроводы, не имеют привязки к субъектам управления, выступают в качестве элементов связи вершин графа в соответствии с технологической схемой объекта. Данный граф может служить для обработки информации на автоматизированном рабочем месте оператора или диспетчера, улучшив восприятие информации с помощью визуализации потоков нефти (путем нахождения маршрута от источника нефти до места откачки) и определения запертых участков нефтепровода (путем определения стека досягаемости от вершин, начинающихся с литеры U, и поиска по стеку вершин типа источников или стоков нефти).

Для решения других задач необходимо реализовывать обработку графа в программируемых логических контроллерах (ПЛК). Ввиду того, что у ПЛК ограниченный объем ресурсов – оперативная память и процессорное время, то основными требованиями, предъявляемыми к алгоритму поиска связности вершин в программируемых логических контроллерах, являются максимальная скорость поиска связи между вершинами и минимальный объем используемой оперативной памяти.

Для минимизации использования объема оперативной памяти необходимо минимизировать граф, сократив вершины, начинающиеся с литеры U, и оставив связность субъектов управления без изменения. Это уменьшит размер хранимой в оперативной памяти матрицы смежности графа и сократит количество итераций при прохождении цикла поиска стека досягаемости.

С учетом этого граф приобретает следующий вид (рис. 3).

Так как процессорное время программируемых логических контроллеров критично к использованию циклов, был модифицирован алгоритм поиска [4], максимально эффективно использующий каждую итерацию программного цикла и обеспечивающий максимизацию скорости поиска стека досягаемости. Для этого используется стек достигаемых вершин с двумя указателями: указатель на последний элемент, занесенный в стек (S), и указатель на вершину из стека (AP), которая анализируется на данном шаге итерации. На каждом шаге итерации происходит занесение в стек вершин, смежных с исследуемой вершиной (по матрице смежности ориентированного графа), но не занесенных ранее. Далее выбирается следующая вершина из стека достигаемых вершин. Если указатель AP становится больше, чем указатель S, то происходит выход из функции. На выходе функции будет получен стек, содержащий все достигаемые вершины от заданной. Максимально возможное количество шагов для нахождения наибольшего стека достигаемости от вершины в данном случае не будет превышать алгебраическую последовательность количества вершин графа  $(1+n)*n/2$ . Это существенно меньше, чем расчет матрицы достижимости по алгоритму Флойда – Уоршела, количество шагов которого равно  $2n^3$  [5].

Алгоритм поиска и удаления вершин, начинающихся с литеры U: из списка вершин выбирается по порядку вершина, начинающаяся с литеры U. Далее данная вершина удаляется из списка вершин. Находится список дуг, начинающихся с идентификатора (первый список) удаленной вершины, и находится список дуг, заканчивающийся на идентификатор (второй список) удаленной вершины.

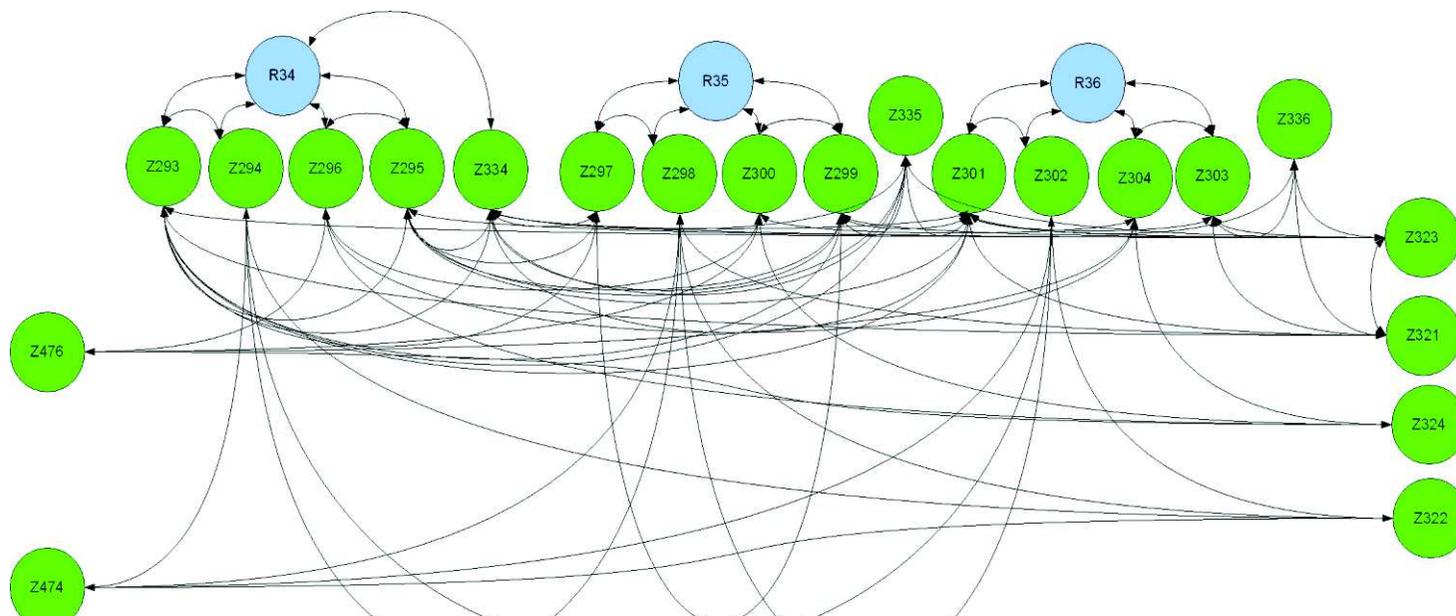


Рис. 3. Представление графа, подготовленного для загрузки в ПЛК

Далее в общий массив дуг добавляются новые дуги таким образом, что каждой дуге из первого списка создаются дуги, начальными вершинами которых являются начальные вершины из второго списка дуг, а конечной вершиной является конечная вершина дуги, обрабатываемой на данный момент.

Далее из общего массива дуг удаляются все дуги, начинающиеся или заканчивающиеся на вершине с идентификатором удаленной вершины.

Как отмечалось выше, каждая вершина имеет свою конкретную привязку к физическому субъекту управления, следовательно, имеет соответствующие характеристики. Такой тип вершин, как задвижка, может иметь следующие два состояния в зависимости от физического положения штока: либо данная вершина имеет связь с другими вершинами (задвижка открыта), либо данная вершина не имеет связей (задвижка закрыта), т. е. состояние задвижки описывается булевой переменной. Инициализация матрицы смежности может быть организована следующим образом.

Дан ориентированный граф объекта  $G$ ,  $G: = (V, A)$ , где  $V$  – непустое множество вершин,  $A$  – множество пар различных вершин, дуги графа.

Для того чтобы привязать свойство к каждой вершине множества  $V$ , представим ее элементы в виде структуры данных:

$$V_n \{ \text{Идентификатор, Тип, Состояние} \}.$$

Если  $V_n. \{ \text{Тип} \} = \text{«Задвижка»}$ ,  $V_n. \{ \text{Идентификатор} \} = \text{«Закрыта»}$ , то  $V_n. \{ \text{Состояние} \} := 0$ .

Если задвижка с идентификатором  $V_n. \{ \text{Идентификатор} \} = \text{«Открыта»}$ , то  $V_n. \{ \text{Состояние} \} := 1$ .

Если задвижка находится в промежуточном состоянии, то можно присвоить  $V_n. \{ \text{Состояние} \}$  как 0, так и 1, в зависимости от требований решаемых задач.

Из массива  $A$  строится матрица смежности, значения элементов которой вычисляются по выражению

$$M_{ij} = V_i. \{ \text{Состояние} \} \cdot V_j. \{ \text{Состояние} \}.$$

## 2. Методики решения задач трубопроводного транспорта

Рассмотрим реализацию задач определения угрозы перекрытия потоков, определения подключенных входных коллекторов к резервуарам, резервуаров к подпорным насосным агрегатам, подпорных насосных агрегатов к магистральным насосным станциям, магистральных насосных станций к узлу подключения станции к магистральному трубопроводу.

Для определения подключенных входных коллекторов к резервуарам необходимо получить стек достигаемых вершин от каждой вершины типа «Входной коллектор», далее проанализировать стек, выбрав вершины типа «Резервуар», и по идентификатору данной вершины определить конкретные резервуары, подключенные к входному коллектору.

Для определения подключенных резервуаров к подпорным насосным агрегатам необходимо получить стек достигаемых вершин от каждой вершины типа «Резервуар», далее проанализировать стек, выбрав вершины типа «Подпорный насосный агрегат» и по идентификатору данной вершины определить подпорные агрегаты, подключенные к резервуару.

Для определения подпорных насосных агрегатов, подключенных к маги-

стральной насосной станции, необходимо получить стек достигаемых вершин от каждой вершины типа «Подпорный насосный агрегат», далее проанализировать стек, выбрав вершины типа «Входной коллектор магистральной насосной станции», и по идентификатору данной вершины определить конкретные магистральные насосные станции, подключенные к подпорному насосу агрегату.

Для определения магистральной насосной станции, подключенной к магистральному трубопроводу, необходимо получить стек достигаемых вершин от каждой вершины типа «Выходной коллектор магистральной насосной станции». Выбрав из стека вершины типа «Узел подключения станции к магистральному трубопроводу» по идентификатору данной вершины, определить конкретные магистральные трубопроводы, подключенные к магистральной насосной станции.

Задачи определения угрозы перекрытия потоков, готовности входных и выходных коллекторов решаются на основании вышеописанных методик идентификации подключений путем определения наличия требуемого типа вершин.

В работе также разработано вспомогательное программное обеспечение, которое позволяет автоматически сформировать из векторного графического файла объекта базу данных вершин и ребер графа, произвести операцию сокращения незначимых вершин в целях подготовки данных для загрузки в ПЛК с сохранением связи значимых вершин, а также загрузить граф в ПЛК по протоколу Modbus TCP.

### **Выводы**

Применение приведенной методики описания модели технологических объектов для автоматизированных систем управления технологическими процессами и приведенные алгоритмы обработки данных решают задачу определения наличия угрозы перекрытия потока и существенно упрощают реализацию контроля перекачки нефти на сложных технологических объектах магистрального трубопроводного транспорта, имеющих множество различных вариантов подключений источников и стоков нефти.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. РД-35.240.50-КТН-109-13 Автоматизация и телемеханизация технологического оборудования площадочных и линейных объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Основные положения (с изменением 1).
2. *Меренков А.П., Хасилев В.А.* Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985.
3. *Харари Ф.* Теория графов. – М.: Едиториал УРСС, 2003.
4. *Степанов В.Н.* Дискретная математика: графы и алгоритмы на графах. – Омск, 2010.
5. *Ананий В., Левитин.* Динамическое программирование: Алгоритм Флойда поиска кратчайших путей между всеми парами вершин // Алгоритмы: введение в разработку и анализ. Гл. 8. – М.: Вильямс, 2006.

*Статья поступила в редакцию 31 августа 2015 г.*

## STRUCTURAL MODELLING OF TRUNK PIPELINE TECHNOLOGY FOR SCADA PROCESSING. THE OPTIMIZATION OF CALCULATION TASKS FOR PLC

*A.A. Kitov, V.K. Tyan*

JSC Transneft Kama  
26a, N. Ershova st., Kazan, 420061, Russian Federation  
Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The paper gives examples of the graph theory practical application in structural mathematical modeling of complex units of trunk pipeline transport. The necessity to use the graph theory is due to the large number of possible pipeline connections between its units (valves, pumps, tanks), which complicates solving actual problem of the determination of threats to shut off the flow in real time. The use of mathematical models will allow implementing the algorithmic processing of data flows and technological processes control.*

**Keywords:** *graph theory, automatic systems, automated systems, databases, discrete mathematics, mathematical modeling of structural, technological objects free transport pipeline.*

---

*Anton A. Kitov, Postgraduate Student.  
Vladimir K. Tyan (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*