УДК 330.46 **DOI: 10.34670/AR.2026.91.64.029**

Сетевые и потоковые модели в управлении цепями поставок

Бочкарев Андрей Александрович

Доктор экономических наук, доцент,
профессор,
Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
191023, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, 30-32, лит. А;
e-mail: andreibochkarev4@gmail.com

Нос Виктор Анатольевич

Доктор экономических наук, профессор,
профессор,
Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
191023, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, 30-32, лит. А;
e-mail: hocvik@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты использования сетевых и потоковых моделей в управлении цепями поставок. В том числе, представлены примеры типовых моделей сетевых и потоковых задач, обзор алгоритмов решения задачи о максимальном потоке в сети, особое внимание уделяется математической постановке задачи о максимальном потоке в сети как задачи линейного программирования. На конкретном примере показана возможность использования задачи о максимальном потоке для оценки потенциала пропускной способности магистральной, локальной и корпоративной транспортной и логистической инфраструктуры при обслуживании перспективных проектов строительства газоконденсатных месторождений (ГКМ) ПАО «Газпром» на полуострове Ямал.

Для цитирования в научных исследованиях

Бочкарев А.А., Нос В.А. Сетевые и потоковые модели в управлении цепями поставок // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Том 15. № 11А. С. 280-295. DOI: 10.34670/AR.2026.91.64.029

Ключевые слова

Цепи поставок, анализ сетей, задача о максимальном потоке, математическая постановка, оптимизация, прикладное использование, управление логистикой, транспортная инфраструктура.

Введение

Анализ сетей (network analysis) является отдельным научным направлением в науке о сетях (network science) со своими собственными теориями и методами, взятыми из других дисциплин, в частности из теории графов и топологии в математике, анализа систем родственных связей в антропологии, анализа социальных групп и процессов в социологии и психологии [Люк, 2017].

Многие задачи транспортного типа также могут быть сформулированы как в виде моделей математического программирования, так и виде сетевых моделей. Например, наиболее часто используемых в логистике и управлении цепями поставок, классическая транспортная задача, транспортная задача с промежуточными пунктами, задача выбора кратчайшего пути, задача коммивояжера, задача и максимальном потоке и ряд других могут быть представлены как в виде моделей линейного программирования, так и в виде графа специального вида, т.е. в виде сетевой модели.

Вследствие специальной структуры сетевых задач для них получено много эффективных алгоритмов и изящных теорем, обеспечивающих решение широкого круга практических задач. В большинстве сетевых задач оптимальные решения являются целочисленными, в отличие от решения общей задачи линейного программирования.

В бизнес-приложениях встречаются самые разнообразные варианты задачи о максимальном, например нахождение максимального пассажиропотока в транспортной системе мегаполиса, регулирование транспортных потоков на автомобильных магистралях, определение количества транспортируемого продукта по каждому из участков трубопроводной сети и прочие [Леоненков, 2005]. На наш взгляд, одним из перспективных приложений данной задачи является ее использование для оценки потенциала пропускной способности магистральной, локальной и корпоративной транспортной и логистической инфраструктуры.

В статье показано, что оценка потенциала пропускной способности магистральной, локальной и корпоративной транспортной и логистической инфраструктуры требует решения задачи о максимальном потоке в сети. В качестве исходных данных рассматриваемой задачи взяты объемы поставок генеральных грузов, оборудования, ГСМ и инертных грузов для строительства Бованенковского ГКМ.

Примеры типовых моделей сетевых и потоковых задач в управлении цепями поставок

Рассмотрим примеры типовых моделей сетевых и потоковых задач, которые нашли широкое применение в логистике и управлении цепями поставок (табл. 1).

Как видно из табл. 1 многие задачи транспортного типа могут быть представлены как в виде сетевой модели, так и в виде модели математического программирования. Представленные в табл. 1 модели задачи о максимальном потоке (1)-(5), классической транспортной задачи (6)-(7) и транспортной задачи с промежуточными пунктами (8)-(9) относятся к классу задач целочисленного линейного программирования, модель задачи выбора кратчайшего пути (10)-(11) – булева программирования, модель задачи коммивояжера (13)-(13) – смешанного целочисленного программирования.

Значительное место в приложениях занимают сетевые задачи, связанные с планированием и составлением расписания выполнения работ по осуществлению больших проектов, по проведению научных исследований и опытных, конструкторских разработок. Сетевые задачи решают также при составлении расписаний движения транспорта, календарного планирования, распределения ресурсов и т.д.

Таблица 1 – Примеры типовых моделей сетевых и потоковых задач в управлении цепями поставок

Наименование и цель задачи	Математическая модель и условные обозначения
Задача о максимальном потоке Определить максимальную величину потока, проходящего по каждому участку сети от начального v_s до конечного v_t пункта, т.е. пропускную способность сети	$\sum_{j=1}^{n} x_{s,j} \to max,$ при ограничениях $\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} x_{s,j} - \sum_{i=1}^{n} x_{i,t} = 0\ ; \\ \sum_{j=1}^{n} x_{i,j} - \sum_{i=1}^{n} x_{j,i} = 0, \forall i \in \{1,2,\ldots,n\}, i \neq s, i \neq t; \\ 0 \leq x_{i,j} \leq c_{i,j}, \forall i,j \in \{1,2,\ldots,n\}; \\ x_{i,j} \in N \cup \{0\}, \forall i,j \in \{1,2,\ldots,n\}. \end{cases}$ где n – количество вершин в сети; v_s – начальная вершина сети (источник); v_t – конечная вершина сети (сток); $x_{i,j}$ – величина потока, проходящего по дуге сети от вершины v_i до вершины v_j; $c_{i,j}$ – пропускная способность дуги (v_i, v_j).
Классическая транспортная задача Составить план перевозок товаров от поставщиков к потребителям, обеспечивающий минимальные транспортные затраты и спрос потребителей	$\sum_{i=1}^{m}\sum\sum_{j=1}^{n} c_{i,j}x_{i,j} \to min,$ при ограничениях $\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} x_{i,j} = S_i, i = 1,\ldots,m; \\ \sum_{i=1}^{m} x_{i,j} = D_j, j = 1,\ldots,n; \\ x_{i,j} \geq 0, i = 1,\ldots,m, j = 1,\ldots,n; \\ x_{i,j} \in N \cup \{0\}, \forall i,j. \end{cases}$ где m – количество поставщиков (источников); n – количество потребителей (стоков); $c_{i,j}$ – стоимость перевозки единицы товара от i-го поставщика к j-му потребителю; S_i – предложение i-го поставщика; D_j – спрос j-го потребителя; $x_{i,j}$ – объемы поставок товара от i-го поставщика к j-му потребителю.
Транспортная задача с промежуточными пунктами Составить план перевозок товаров от поставщиков к потребителям с учетом промежуточных пунктов (складов), обеспечивающий минимальные транспортные затраты и спрос потребителей	$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} c_{i,j}\, x_{i,j} \to min,$ при ограничениях $\begin{cases} \sum_{j\in J} x_{i,j} = S_i, \forall i \in I; \\ \sum_{i\in I} x_{i,j} = D_j, \forall j \in J; \\ \sum_{j\in J} x_{k,j} + x_{k,k} = T_k + B, \forall i \in I; \\ \sum_{i\in I} x_{i,k} + x_{k,k} = B, \forall j \in J; \\ x_{i,j} \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J; \\ x_{i,j} \in N \cup \{0\}, \forall i \in I, \forall j \in J. \end{cases}$ где J – множество номеров складов, на которые товар может быть доставлен с k-го склада; I – множество номеров складов, с которых товар может быть доставлен на k-й склад; $c_{i,j}$ – стоимость перевозки единицы товара от i-го до j-го пункта;

Наименование и цель задачи	Математическая модель и условные обозначения
	S_i – исходное предложение i-го поставщика; D_j – исходный спрос j-го потребителя; T_k – величина «чистого» запаса товара, равная объему исходного предложения или исходного спроса; B – величина «буферного» запаса; $x_{i,j}$ – объемы поставок товара от i-го до j-го пункта.
Задача выбора кратчайшего пути Найти кратчайший путь из заданной i-го узла сети в заданный j-й узел	$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{i,j}x_{i,j} \to min;$ при ограничениях $\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} x_{s,j} - \sum_{i=1}^{n} x_{i,s} = 1, i,j = 1,\dots,n, i \neq s, j \neq s; \\ \sum_{j=1}^{n} x_{t,j} + \sum_{i=1}^{n} x_{i,t} = -1, i,j = 1,\dots,n, i \neq t, j \neq t; \\ \sum_{j=1}^{n} x_{i,j} - \sum_{i=1}^{n} x_{j,i} = 0, i,j = 1,\dots,n, i \neq j; \\ x_{i,j} \in \{0,1\}, i,j = 1,\dots,n. \end{cases}$ где n – количество узлов сети; $c_{i,j}$ – расстояние (стоимость, время проезда) от i-го до j-го узла сети; $x_{i,j}$ – булевы переменные, которые интерпретируются следующим образом: переменная $x_{i,j}$=1, если дуга (i, j) входит в искомый маршрут минимальной длины, и $x_{i,j}$=0 – в противном случае.
Задача коммивояжера Построить такой маршрут обхода всех n пунктов (по одному разу каждого), при котором общая длина пути будет минимальной	$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{i,j}\, x_{i,j} \to min$, (12) при ограничениях $\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} x_{i,j} = 1, i = 1,\dots,n; \\ \sum_{i=1}^{n} x_{i,j} = 1, j = 1,\dots,n; \\ u_i - u_j + n \cdot x_{i,j} \le n-1, i,j = 2,\dots,n, i \neq j; \\ x_{i,j} \in \{0,1\}, i,j = 1,\dots,n; \\ u_i \in R, i = 2,\dots,n. \end{cases}$ (13) где n – количество узлов сети; $c_{i,j}$ – расстояние (стоимость, время проезда) от i-го до j-го узла сети; $x_{i,j}$ – булевы переменные, которые интерпретируются следующим образом: переменная $x_{i,j}$=1, если дуга (i, j) входит в искомый простой цикл из n вершин и n дуг минимального общего веса и $x_{i,j}$=0, в противном случае; u_i – переменные (неограниченные действительные числа).

Источник: разработано авторами по [Бочкарев, Бочкарев, 2025; Грешилов, 2006; Кормен и др., 2009]

Задача о максимальном потоке также, как и все сетевые задачи может быть представлена в виде модели линейного программирования (см. табл. 1). Однако в силу специфики этой задачи сетевые методы решения здесь оказываются более эффективными, чем симплекс-метод, применяемый для решения общей задачи линейного программирования. Рассматриваемая задача может быть решена с помощью метода Форда-Фалкерсона, алгоритм Эдмондса-Карпа, метода проталкивания предпотока, алгоритма «поднять в начало» (relabel-to-front), алгоритм Голдберга-Рао и др. [Кормен и др., 2009, с. 734-794].

Метод Форда-Фалкерсона, предложенный в 1957 г. основоположниками формальных исследований ряда задач в области транспортных сетей Фордом и Фалкерсоном (Lestor R. Ford and D.R. Fulkerson), является исторически первым и одним из наиболее эффективных методов решения задачи о максимальном потоке в сети [Леоненков, 2005, с. 350].

Характеристика различных алгоритмов решения задачи о максимальном потоке представлена в табл. 2.

Таблица 2 - Характеристика алгоритмов решения задачи о максимальном потоке

Название алгоритма	Характеристика алгоритма
Алгоритм пометок Форда-Фалекрсона	Алгоритм имеет итеративный характер и позволяет найти максимальный поток в сети, выходящей из начальной вершины и входящей в конечную вершину сети. Сущность алгоритма заключается в построении на каждой итерации некоторого частичного потока, также выходящего из начальной вершины и входящего в конечную вершину сети. Все такие частичные потоки в совокупности и представляют искомый максимальный поток. Недостаток: при неудачном методе поиска увеличивающего пути p из источника v_s в сток v_t в остаточной сети G_f алгоритм может работать бесконечно.
Алгоритм Эдмондса-Карпа	Отличается от метода Форда-Фалкерсона тем, что в качестве увеличивающего пути p выбирается кратчайший путь из вершины v_s в вершину v_t в остаточной сети G_f, где каждое ребро имеет единичную длину (вес). Позволяет преодолеть указанный недостаток метода Форда-Фалкерсона.
Алгоритм проталкивания предпотока	Алгоритм проталкивания предпотока работает более локальным способом, чем метод Форда-Фалкерсона. вместо того, чтобы для поиска увеличивающего пути анализировать всю остаточную сеть, алгоритм проталкивания предпотока обрабатывает вершины по одной, рассматривая только соседей данной вершины в остаточной сети. Кроме того, в отличие от метода Форда-Фалкерсона, данный алгоритм не обеспечивает в ходе своего выполнения свойство сохранения потока.
Алгоритм «поднять в начало»	Алгоритм «поднять в начало» поддерживает список вершин сети. Алгоритм сканирует список с самого начала, выбирает некоторую переполненную вершину v_k, а затем «разгружает» ее, т.е. выполняется операция проталкивания и подъема потока до тех пор, пока избыток в v_k не станет равен 0. Если выполнилось поднятие вершины, то она переноситься в начало списка (отсюда и название алгоритма «поднять в начало»), и алгоритм начинает очередное сканирование списка.
Алгоритм Голдберга-Рао	Алгоритм Голдберга-Рао основан на нахождении тупиковых потоков в сети. В данном алгоритме ребрам с высокой пропускной способностью присваивается длина 0, а ребрам с низкой пропускной способностью – длина 1. Неформально при таком выборе длин кратчайшие пути от источника к стоку будут иметь высокую пропускную способность, следовательно, потребуется меньшее количество итераций. Алгоритм Голдберга-Рао асимптотически самый быстрый из известных в настоящее время алгоритмов для задачи о максимальном потоке.

Источник: разработано авторами по [Кормен и др., 2009]; [Кормен и др., 2009]

Несмотря на то, что по быстродействию специальные алгоритмы поиска максимального потока в сети превосходят алгоритмы линейного программирования, по нашему мнению, для решения широкого круга задач более удобным является представление сетевых и потоковых задач в виде моделей линейного, целочисленного, булева или смешанного программирования, что облегчает построение алгоритма решения данных задач и получение оптимального решения. В данном случае для поиска оптимального решения могут быть использованы как возможности электронных таблиц MS Excel и LibreOffice Calc, так и универсальных математических пакетов, например MathCAD или MATLAB, или языков программирования Python, R, Julia и других.

Содержательная постановка задачи

Производственная деятельность промышленных предприятий различного профиля связана с необходимостью осуществления грузовых перевозок при доставке сырья, материалов, полуфабрикатов, готовой продукции. Для удовлетворения потребностей в перевозках создаются транспортные системы и вся необходимая территориальная инфраструктура. Формирование и развитие таких систем тесно связано с особенностями и объемами регионального производства, наличием устойчивых транспортных связей между предприятиями, а также перспективами развития промышленных зон и территорий [Слободянюк, 2017, с. 32].

Вышесказанное в полной мере относится к формированию территориальной транспортной и логистической инфраструктуры при обслуживании грузопотоков в рамках проектов освоения ГКМ ПАО «Газпром» на полуострове Ямал. При этом под территориальной транспортной и логистической инфраструктурой мы будем понимать совокупность транспортных путей, узлов, складских комплексов и распределительных центров и других элементов инфраструктуры, обеспечивающих возможность эффективного продвижения транспортных и материальных потоков при осуществлении подразделениями ПАО «Газпром» своей деятельности на полуострове Ямал.

Таким образом, территориальную транспортную систему мы будем рассматривать как совокупность источников и потребителей транспортных потоков, взаимодействие которых происходит на базе единой транспортной сети с целью удовлетворения существующих потребностей в грузоперевозках [Слободянюк, 2017, с. 33].

Следует отметить, что магистральная, локальная и корпоративная транспортная и логистическая инфраструктура ПАО «Газпром» по обеспечения строящихся ГКМ на полуострове Ямал является многоуровневой и включает в себя:

- межрегиональный уровень – магистральная транспортная и логистическая инфраструктура (III пояс), включающая: 1) поставщиков; 2) участки магистральной доставки железнодорожным транспортом; 3) перевалочные базы на магистральном транспорте / речные порты / морские порты;
- региональный уровень – локальная транспортная и логистическая инфраструктура (II пояс), включающая: 1) участок доставки морским транспортом по маршруту Архангельск – Харасавэй; 2) участок доставки железнодорожным транспортом по ведомственной железнодорожной линии; 3) участки доставки автомобильным транспортом с использованием зимников; 4) участки доставки автомобильным транспортом с использованием всесезонных автомобильных дорог; 5) перевалочные базы / речные порты / морские порты на полуострове Ямал (преимущественно корпоративного уровня);
- местный уровень – корпоративная транспортная и логистическая инфраструктура (I пояс), включающая: 1) участки доставки автомобильным транспортом с использованием зимников; 2) участки доставки автомобильным транспортом с использованием всесезонных автомобильных дорог; 3) участок доставки железнодорожным транспортом; 4) временные и постоянные базы хранения на ГКМ; 5) участки доставки на места строительства автомобильным транспортом с использованием зимников; 5) строящиеся газоконденсатные месторождения.

Рассмотрим содержательную постановку на примере уже введенного в эксплуатацию Бованенковского ГКМ. Бованенковское месторождение расположено на полуострове Ямал на расстоянии 120 км от побережья Карского моря. Доставка грузов для обустройства и эксплуатации Бованенковского месторождения осуществляется: 1) морским транспортом из Архангельского морского торгового порта (ОАО «АМТП») в портопункт Харасавэй или до рейда реки Мордыяха; 2) речным транспортом от причал Лабытнангской базы ПТОиК до портопункта Харсавэй или с причалов Сергино, Тюмень, Тобольск, Сургут до портопункта Харсавэй; 3) железнодорожным транспортом до железнодорожной станции Бованенково и далее автотранспортом по зимней автодороге до промбазы Бованенковского ГКМ (ПБ БГКМ). Если используется морской или речной путь доставки, то на конечном этапе возможна доставка как водным (речным) транспортом, так и автотранспортом по зимней автодороге, поэтому всего имеется девять вариантов доставки, представленных ниже.

Морской путь

- Схема№1 (А) Архангельск – Харасавэй – Бованенково (доставка по автозимнику на конечном участке);
- Схема№1 (Б) Архангельск – Харасавэй – Бованенково (доставка водным транспортом на конечном участке);
- Схема№1 (В) Архангельск – рейд р. Мордыяха – Бованенково (доставка водным транспортом на конечном участке);
- Схема№1 (Г) Архангельск – Харасавэй (припай) – Бованенково (доставка по автозимнику на конечном участке).

Речной путь

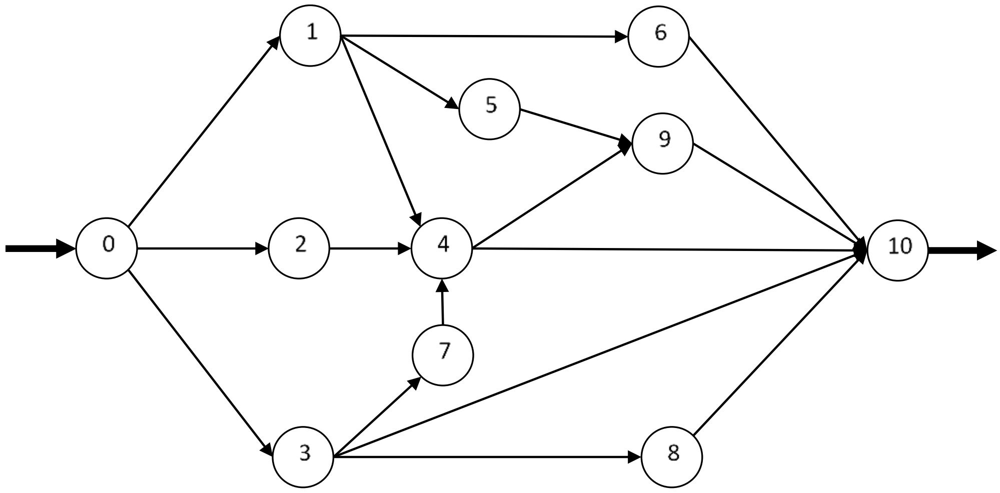
- Схема№2 (А) Лабытнанги – Харасавэй – Бованенково (доставка водным транспортом на конечном участке);
- Схема№2 (Б) Лабытнанги – Харасавэй – Бованенково (доставка по автозимнику на конечном участке);
- Схема№2 (В) Сергино – Харасавэй – Бованенково (доставка водным транспортом на конечном участке);
- Схема№2 (Г) Сергино – Харасавэй – Бованенково (доставка по автозимнику на конечном участке).

Железнодорожный путь

- Схема №3 Лабытнанги – ж/д ст. Хралов (ж/д ст. Бованенково с 2010 г.) – Бованенково (доставка по автозимнику на конечном участке).

Таким образом, принципиальные схемы доставки строительных материалов и оборудования для строительства Бованенковского ГКМ представлены на рис. 1.

Следует отметить, что мы не рассматриваем доставку грузов магистральным транспортом от конкретных поставщиков до морского порта Архангельск, речного порта Сергино и железнодорожной станции Лабытнанги, поэтому на рис. 1 представлен условный поставщик, предложение которого равно суммарному предложению всех реальных поставщиков. Также мы не рассматриваем доставку грузов от ПБ БГКМ до кустов газовых скважин. Таким образом, рассматриваемая нами модель будет охватывать локальную и корпоративную транспортная и логистическая инфраструктура ПАО «Газпром», но без кустов газовых скважин Бованенковского газоконденсатного месторождения.



Условные обозначения:

– элементы транспортной схемы; 0 – поставщик; 1 – морской порт Архангельск; 2 – речной порт Сергино; 3 – ж/д ст. Лабытнанги; 4 – портопункт Харасавэй; 5 – рейд р. Мордыяха; 6 – портопункт Харасавэй (припай); 7 – речной порт Лабытнанги; 8 – ж/д ст. Бованенково; 9 – причал Бованенково; 10 – ПБ БГКМ

Источник: разработано авторами

Рисунок 1 – Принципиальные схемы доставки строительных материалов и оборудования для строительства Бованенковского ГКМ

Математическая постановка задачи

В задаче о максимальном потоке в сети транспортная сеть – это ориентированный связный граф. То есть все дуги графа ориентированы (транспортный поток, проходящий через данную сеть, имеет строго заданное направление от входа в сеть к выходу) и между каждой парой вершин графа всегда должен быть хотя бы один путь. Также граф не должен содержать циклов.

Цель задачи о максимальном потоке в сети – определить транспортный поток максимального объёма, протекающий в данной рассматриваемой сети из начальной вершины в конечную.

Математическая постановка задачи о максимальном потоке транспортных средств в городской транспортной сети может быть описана следующим образом.

Задан граф транспортной сети $G = (V, E, h)$,

где $V = (v_1, v_2, \ldots, v_n)$– конечное множество вершин (пунктов транспортной сети, в нашем случае – транзитных грузов), в котором выделяют v_s – начальную вершину (источник), v_t – конечную вершину (сток);

$E = (e_1, e_2, \ldots, e_m)$ – конечное множество дуг (альтернативных маршрутов доставки грузов различными видами транспорта);

$h: E \to Z_+$ – весовая функция дуг, которая интерпретируется как пропускная способность дуги;

$c_{i,j} = h(v_i, v_j)$ – пропускная способность дуги (v_i, v_j), т/год (пропускная способность на участке транспортной сети от пункта i до пункта j).

Введем $x_{i,j}$ – неотрицательные переменные, которые интерпретируются как годовая величина потока материальных ресурсов, проходящего по дуге $(v_i, v_j) \in E$, т/год.

Математическая постановка задачи сводится к определению значений переменных $x_{i,j}$, доставляющих максимум целевой функции

$$\sum_{j=1}^{n} x_{s,j} \to \max; \tag{1}$$

при ограничениях

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} x_{s,j} - \sum_{i=1}^{n} x_{i,t} = 0; & (2) \\ \sum_{j=1}^{n} x_{i,j} - \sum_{i=1}^{n} x_{j,i} = 0, \forall i,j \in \{1,2,\ldots,n\}, i \neq s, j \neq t; & (3) \\ 0 \leq x_{i,j} \leq c_{i,j}, \forall i,j \in \{1,2,\ldots,n\}; & (4) \\ x_{i,j} \in R, \forall i,j \in \{1,2,\ldots,n\}. & (5) \end{cases}$$

Целевая функция (1) означает, что сумма потоков материальных ресурсов, выходящих из начальной вершины (источника), должна быть максимальной.

Ограничения вида (2) требуют, чтобы величина потока, выходящего из вершины v_s (источника), должна быть равна величине потока, входящего в вершину v_t (сток). Ограничения вида (3) требуют, чтобы любой частичный поток, входящий в каждую промежуточную вершину графа должен быть равен потоку, выходящему из этой вершины. Общее количество ограничений (2) и (3) равно $n-1$ (n– число вершин графа). Ограничения вида (4) указывают, что величина потока, протекающего по дуге $(v_i, v_j) \in E$, должна быть неотрицательной и не должна превышать пропускной способности этой дуги $c_{i,j}$. Ограничения вида (5) указывают, что переменные $x_{i,j}$ – действительные числа.

Задача определения максимального потока в сети с несколькими источниками и несколькими стоками сводится к задаче с одним источником и одним стоком. Для этого добавляется фиктивный источник v_s и ориентированные дуги (v_s, v_j) с $c_{s,j} = h(v_s, v_j) = \infty \ (\forall j \in \{1,2,\ldots,n\})$. Точно так же создается новый фиктивный сток v_t и добавляются ориентированные дуги (v_i, v_t) с $c_{i,t} = h(v_i, v_t) = \infty \ (\forall i \in \{1,2,\ldots,n\})$. Очевидно, что единственный источник v_s просто обеспечивает поток любого требуемого объема к источникам v_j, а единственный сток v_t аналогичным образом потребляет поток любого желаемого объема от множественных стоков v_i.

Таким образом, задача нахождения величины максимального потока в любой сети является задачей линейного программирования: максимизировать функцию (1) при условиях-ограничениях (2)-(5).

Пример численного решения задачи и анализ результатов

Фактические объемы поставок строительных материалов и оборудования для строительства Бованенковского ГКМ по различным маршрутам представлены в табл. 3.

Таблица 3 - Плановые объемы поставок строительных материалов и оборудования для строительства Бованенковского ГКМ по различным маршрутам

Доставка МТР по направлениям	Тонны	Относительная доля, % от Q год
Плановый годовой объем поставок Q год, т	1542584,2	100,0%
1. Доставка МТР из Архангельска	123406,7	8,0%
в том числе:		
портопункт Харасавэй	77129,2	5,0%
рейд р. Мордыяха	15425,8	1,0%
п. Харасавэй (припай)	30851,7	2,0%
Доставка МТР из Харасавэя (а/т)	231387,6	15,0%
Доставка МТР из Харасавэя (река)	46277,5	3,0%
2. Доставка МТР из Лабытнанги (река)	107980,9	7,0%
3. Доставка МТР из Сергино (река)	61703,4	4,0%
4. Доставка МТР из Лабытнанги (ж/д)	1064383,1	69,0%
5. Доставка МТР из Лабытнанги (а/т)	185110,1	12,0%
Итого (1 + 2 + 3 + 4 + 5):	1542584,2	100,0%

Примечание – Данные, представленные в табл. 1, соответствуют году с максимальными ежегодными объемами поставок материально-технических ресурсов за весь период строительства Бованенковского ГКМ.

Исходный сетевой граф задачи о максимальном потоке для оценки потенциала пропускной способности локальная и корпоративную транспортная и логистическая инфраструктура ПАО «Газпром» на полуострове Ямал представлен на рис. 1., а исходные данные для решения задачи о максимальном потоке – в табл. 4.

Таблица 4 - Исходные данные для решения задачи о максимальном потоке для определения пропускной способности транспортной и логистической инфраструктуры ПАО «Газпром» в рамках проекта освоения Бованенковского ГКМ (Источник: разработано авторами)

Вершина начало $v(i)$		Вершина конец $v(j)$		Пропускная способность дуги $c(i,j)$
Обозначение	Описание	Обозначение	Описание	
0	Фиктивный поставщик	1	морской порт Архангельск	1542584,2[2]
0	Фиктивный поставщик	2	речной порт Сергино	1542584,2[2]
0	Фиктивный поставщик	3	ж/д ст. Лабытнанги	1542584,2[2]
1	морской порт Архангельск	4	портопункт Харасавэй	1542584,2
1	морской порт Архангельск	5	рейд р. Мордыяха	1542584,2
1	морской порт Архангельск	6	п. Харасавэй (припай)	1542584,2
2	речной порт Сергино	4	портопункт Харасавэй	1542584,2
3	ж/д ст. Лабытнанги	7	речной порт Лабытнанги	700000,0[3]
3	ж/д ст. Лабытнанги	8	ж/д ст. Бованенково	1400000,0[4]

Вершина начало *v*(*i*)		**Вершина конец *v*(*j*)**		**Пропускная способность дуги *c*(*i,j*)**
Обозначение	**Описание**	**Обозначение**	**Описание**	
3	ж/д ст. Лабытнанги	10	ПБ БГКМ	350000[5]
4	портопункт Харасавэй	9	причал Бованенково	1542584,2
4	портопункт Харасавэй	10	ПБ БГКМ	350000[5]
5	рейд р. Мордыяха	9	причал Бованенково	1542584,2
6	п. Харасавэй (припай)	10	ПБ БГКМ	350000[5]
7	речной порт Лабытнанги	4	портопункт Харасавэй	1542584,2
8	ж/д ст. Бованенково	10	ПБ БГКМ	350000[5]
9	причал Бованенково	10	ПБ БГКМ	350000[5]

Примечания:

1. Плановые объемы поставок для решения задачи о максимальном потоке в прямом направлении взяты по данным табл. 3;
2. Фиктивный источник обеспечивает поток любого требуемого объема;
3. Пропускная способность речного порта Лабытнанги принята равной 700000,0 тонн в год;
4. Пропускная способность железнодорожной ветки в направлении ж/д ст. Лабытнанг – ж/д ст. Бованенково принята равной 1 400 000,0 тонн в год;
5. Пропускная способность автозимников принята равной 350000,0 тонн.

Задача о максимальном потоке решена в Excel. Результаты решения задачи о максимальном потоке представлены в табл. 5, табл. 6 и на рис. 2.

Таблица 5 - Результаты для решения задачи о максимальном потоке для определения пропускной способности транспортной и логистической инфраструктуры ПАО «Газпром» в рамках проекта освоения Бованенковского ГКМ

Вершина-начало v(i)	**Вершина-конец v(j)**	**Пропускная способность дуги c(i,j)**	**Переменные x(ij)**	**Ограничения**
0	1	1542584,2	**1050000,0**	**0**
0	2	1542584,2	**0,0**	**0**
0	3	1542584,2	**700000,0**	**0**
1	4	1542584,2	**350000,0**	**0**
1	5	1542584,2	**350000,0**	**0**
1	6	1542584,2	**350000,0**	**0**
2	4	1542584,2	**0,0**	**0**
3	7	700000,0	**0,0**	**0**
3	8	1400000,0	**350000,0**	**0**
3	10	350000,0	**350000,0**	**0**
4	9	1542584,2	**0,0**	
4	10	350000,0	**350000,0**	
5	9	1542584,2	**350000,0**	
6	10	350000,0	**350000,0**	
7	4	1542584,2	**0,0**	
8	10	350000,0	**350000,0**	
9	10	350000,0	**350000,0**	

Источник: разработано авторами

Максимальная величина потока в сети равна 1 750 000,0 тонн в год.

Анализ решения задачи о максимальном потоке для определения пропускной способности транспортной и логистической инфраструктуры ПАО «Газпром» в рамках проекта освоения

Бованенковского ГКМ показывает, что узким местом транспортно-логистической сети является сеть автозимников, связывающая перевалочные базы на полуострове Ямал с промбазой Бованенковского ГКМ (см. рис. 2, дуги сетевого графа красного цвета).

Все остальные участки сети в левой части графа либо имеют резерв пропускной способности (см. рис 2, дуги сетевого графа зеленого цвета), либо не используются (см. рис 2, дуги сетевого графа черного цвета), т.к. реальный поток в сети (плановый объем поставок) меньше пропускной способности отдельных участков сетевого графа.

Таблица 6 – Анализ решения задачи о максимальном потоке для определения пропускной способности транспортной и логистической инфраструктуры ПАО «Газпром» в рамках проекта освоения Бованенковского ГКМ

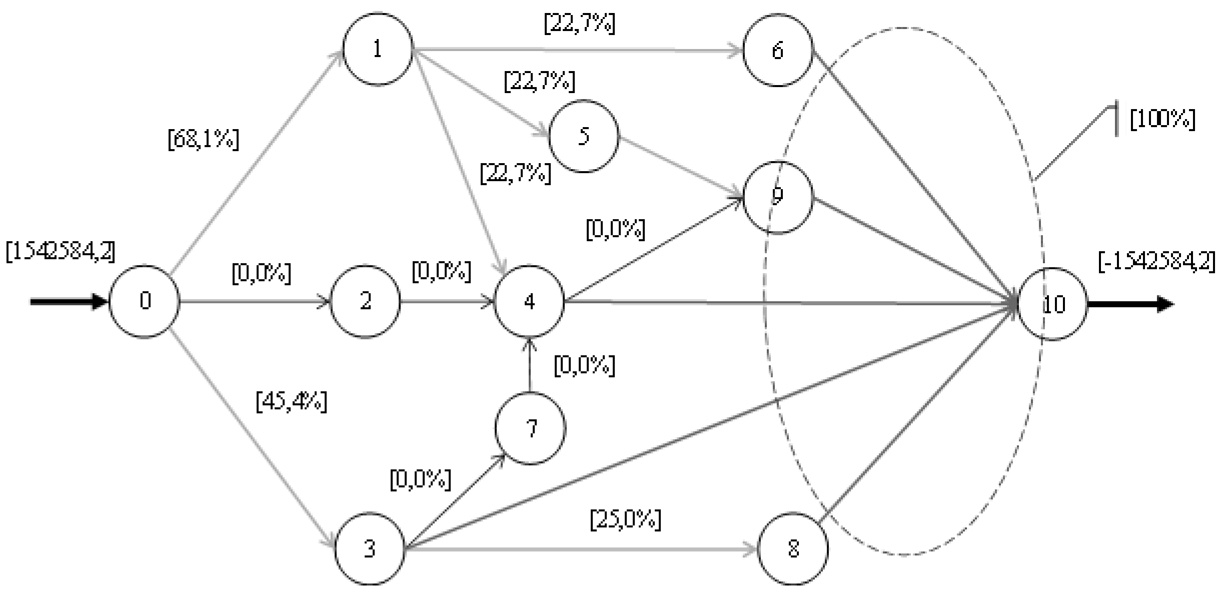
Вершина-начало v(i)	Вершина-конец v(j)	Пропускная способность дуги c(i,j)	Переменные x(i,j)	Загрузка участка сети, %
0	1	1542584,2	1050000,0	68,1%
0	2	1542584,2	0,0	0,0%
0	3	1542584,2	700000,0	45,4%
1	4	1542584,2	350000,0	22,7%
1	5	1542584,2	350000,0	22,7%
1	6	1542584,2	350000,0	22,7%
2	4	1542584,2	0,0	0,0%
3	7	700000,0	0,0	0,0%
3	8	1400000,0	350000,0	25,0%
3	10	350000,0	350000,0	100,0%
4	9	1542584,2	0,0	0,0%
4	10	350000,0	350000,0	100,0%
5	9	1542584,2	350000,0	22,7%
6	10	350000,0	350000,0	100,0%
7	4	1542584,2	0,0	0,0%
8	10	350000,0	350000,0	100,0%
9	10	350000,0	350000,0	100,0%

Источник: разработано авторами

Таким образом, проведенный анализ подтверждает, что на участках транспортно-логистического сети II и III поясов охвата остается значительный резерв пропускной способности даже использования схемы доставки речным транспортом. Ограничения по пропускной способности от вершин 3, 4, 6, 8 и 9 до вершины 10, т.е. ограничения по проектной пропускной способности автозимников на полуострове Ямал, не позволяют увеличить пропускную способность сети выше 1 750 000,0 тонн груза в год, следовательно **являются лимитирующими**.

Максимальная пропускная способность транспортно-логистической сети составляет $(1750000{,}0/1542584{,}2)\times100=113{,}45\%$ от планового объема перевозок и может быть увеличена только путем увеличения пропускной способности автодорог на полуострове Ямал.

Соответственно, резерв пропускной способности транспортно-логистической сети составляет $(1750000{,}0-1542584{,}2)/1542584{,}2)\times100\%=13{,}45\%$, т.е. является ограниченным.



Источник: разработано авторами

Рисунок 2 – Сетевой граф задачи о максимальном потоке в прямом направлении после оптимизации

Следует отметить, что выше был рассмотрен базовый сценарий, который предусматривает сдачу инфраструктурных транспортных и логистических объектов и объектов строительства в плановые сроки и плановые объемы перевозок грузов для объектов строительства. По нашему мнению, для всесторонней оценки пропускной способности транспортной и логистической инфраструктуры ПАО «Газпром» на полуострове Ямал и прилегающих акваториях целесообразно рассмотреть следующие сценарии:

- Базовый сценарий (сценарий 1) – сдача инфраструктурных транспортных и логистических объектов и объектов строительства в плановые сроки – фактические объемы перевозок грузов для объектов строительства ПАО «Газпром» на полуострове Ямал и прилегающих акваториях соответствуют плановым значениям, доступны все варианты доставки;
- Пессимистические сценарии (сценарии 2 … k-1) – это сценарии, связанные с недоступностью некоторых схем доставки или связанные с ограничениями в использовании объектов логистической инфраструктуры. Например, задержка с вводом в эксплуатацию инфраструктурных транспортных и логистических объектов на полуострове Ямал.
- Пессимистические сценарии (сценарии k … m) – это сценарии, связанные с необходимостью увеличения фактических объемов перевозок относительно плановых значений. По нашему мнению, рассмотрение таких сценариев связана с возможной неритмичной сдачей объектов строительства ПАО «Газпром» на полуострове Ямал и прилегающих акваториях (сдвиг «вправо» сроков сдачи объекта строительства, следовательно, снижение объемов перевозок грузов в плановый год сдачи объектов и увеличение этих объемов в последующие года).
- Пессимистические сценарии (сценарии m … n) – это сценарии, связанные с влиянием на пропускную способность транспортно-логистического системы нескольких неблагоприятных факторов одновременно. Например, целесообразно рассмотреть

сценарии, предусматривающие одновременно как ограничения в использовании объектов логистической инфраструктуры, так и увеличение фактических объемов перевозок относительно плановых значений.

Очевидно, что транспортная и логистическая инфраструктура используется не только для доставки материально-технических ресурсов для строительства газоконденсатных месторождений ПАО «Газпром» на полуострове Ямал, но и для транспортировки в обратном направлении сжиженных углеводородных газов и газового конденсата.

Основные задачи, подзадачи и сценарии для оценки потенциала пропускной способности магистральной, локальной и корпоративной транспортной и логистической инфраструктуры при обслуживании перспективных проектов ПАО «Газпром» на полуострове Ямал представлены в табл. 7.

Таблица 7 - Основные задачи, подзадачи и сценарии для оценки потенциала пропускной способности магистральной, локальной и корпоративной транспортной и логистической инфраструктуры при обслуживании перспективных проектов ПАО «Газпром» на полуострове Ямал

Задача	Подзадача	Сценарий
1. Задача о максимальном потоке в сети в прямом направлении	1.1. Генеральные грузы, оборудование, ГСМ и инертные грузы	1.1.1. Базовый сценарий (сценарий 1)
		1.1.2. Пессимистические сценарии (сценарии 2 … k-1)
		1.1.3. Пессимистические сценарии (сценарии k-1 … m)
		1.1.4. Пессимистические сценарии (сценарии m … n)
2. Задача о максимальном потоке в сети в обратном направлении	2.1. Газовый конденсат стабильный и сжиженные углеводородные газы	2.1.1. Базовый сценарий (сценарий 1)
		2.1.2. Пессимистические сценарии (сценарии 2 … m-1)
		2.1.3. Пессимистические сценарии (сценарии m … n)
		2.1.4. Пессимистические сценарии (сценарии m … n)

Источник: разработано авторами

Таким образом, для каждой подзадачи необходимо рассмотреть один базовый сценарий и n – 1 пессимистических сценариев. Каждый из сценариев представляет собой набор исходных данных и ограничений задачи. Следует отметить, что объемы поставок сжиженных углеводородных газов и газового конденсата с действующих газоконденсатных месторождений на полуострове Ямал потребителям значительно превышают объемы поставок материально-технических ресурсов для строительства этих газоконденсатных месторождений. Следовательно, при решении задачи о максимальном потоке в обратном направлении возможными узкими местами будут являться, кроме сети всесезонных автомобильных дорог и автозимников, ограниченная пропускная способность железнодорожной ветки, речных портов и портопунктов на полуострове Ямал.

Заключение

В статье рассмотрены теоретические и практические аспекты использования сетевых и потоковых моделей в управлении цепями поставок. Предложено для определения пропускной способности магистральной, локальная и корпоративная транспортная и логистическая инфраструктура ПАО «Газпром» по обеспечения строящихся ГКМ на полуострове Ямал использовать модель задачи о максимальном потоке. На примере Бованенковского ГКМ показана применимость этой модели для определения узких мест транспортной и логистической инфраструктуры ПАО «Газпром» на полуострове Ямал при доставке строительных материалов и оборудования для строительства Бованенковского ГКМ.

Рассмотрены основные задачи, подзадачи и сценарии для оценки потенциала пропускной способности магистральной, локальной и корпоративной транспортной и логистической инфраструктуры при обслуживании перспективных проектов ПАО «Газпром» на полуострове Ямал, которые, на наш взгляд, могут послужить концептуальной основой поддержки принятия управленческих решений при реализации перспективных проектов освоения газоконденсатных месторождений ПАО «Газпром» на полуострове Ямал.

Библиография

1. Бочкарев А.А., Бочкарев П.А. Логистика городских транспортных систем: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2025. 162 с. (Высшее образование). ISBN 978-5-534-15747-5. Текст: электронный. URL: https://urait.ru/bcode/563448
2. Грешилов А.А. Математические методы принятия решений: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 584 с.
3. Кормен Т., Лайзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы построение и анализ. 2-е изд., пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2009. 1296 с.
4. Леоненков А.В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 704 с.
5. Люк Д. Анализ сетей (графов) в среде R. Руководство пользователя / пер. с англ. А. В. Груздева. М.: ДМК Пресс, 2017. 250 с.
6. Слободянюк М.Э. Моделирование транспортных систем. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 296 с.

Network and Flow Models in Supply Chain Management

Andrei A. Bochkarev

Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor,
Saint-Petersburg State University of Economics,
191023, 30-32, letter A, Griboyedov Canal Emb., Saint-Petersburg, Russian Federation;
e-mail: andreibochkarev4@gmail.com

Viktor A. Nos

Doctor of Economic Sciences, Professor,
Saint-Petersburg State University of Economics,
191023, 30-32, letter A, Griboyedov Canal Emb., Saint-Petersburg, Russian Federation;
e-mail: hocvik@yandex.ru

Abstract

The article discusses theoretical and practical aspects of using network and flow models in supply chain management. Examples of typical network and flow problem models are presented, along with an overview of algorithms for solving the maximum flow problem in a network. Special attention is paid to the mathematical formulation of the maximum flow problem in a network as a linear programming problem. Using a specific example, the possibility of applying the maximum flow problem to assess the potential throughput capacity of trunk, local, and corporate transport and logistics infrastructure for servicing prospective gas condensate field (GCF) construction projects of PJSC "Gazprom" on the Yamal Peninsula is demonstrated.

For citation

Bochkarev A.A., Nos V.A. (2025) Setevyye i potokovyye modeli v upravlenii tsepyami postavok [Network and Flow Models in Supply Chain Management]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 15 (11A), pp. 280-295. DOI: 10.34670/AR.2026.91.64.029

Keywords

Supply chains, network analysis, maximum flow problem, mathematical formulation, optimization, practical application, logistics management, transport infrastructure.

References

1. Bochkarev, A.A. Logistics of urban transport systems [Logistika gorodskih transportnyh sistem]: a textbook for universities / A.A. Bochkarev, P.A. Bochkarev. — 3rd ed., reprint. and add. Moscow: Yurait Publishing House, 2025. 162 p. (Higher education). — ISBN 978-5-534-15747-5. — Text : electronic // Educational platform Yurayt [website]. URL: https://urait.ru/bcode/563448.
2. Greshilov, A.A. Mathematical methods of decision-making [Matematicheskie metody prinyatiya reshenij]: textbook. handbook for universities / A.A. Greshilov. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2006. 584 p.
3. Kormen, T. Introduction to Algorithms [Algoritmy postroenie i analiz] / Thomas H. Kormen, Charles I. Lizerson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein. – 2nd ed., translated from English. – Moscow: Williams Publishing House, 2009. – 1296 p.
4. Leonenkov, A.V. Solving optimization problems in the MS Excel environment [Reshenie zadach optimizacii v srede MS Excel] / A.V. Leonenkov. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005. – 704 p.
5. Luke, D. Analysis of networks (graphs) in the R environment. User's Guide [Analiz setej (grafov) v srede R. Rukovodstvo pol'zovatelya] / translated from English by A.V. Gruzdev. Moscow: DMK Press, 2017. 250 p.
6. Slobodyanyuk, M.E. Modeling of transport systems. [Modelirovanie transportnyh sistem]. – Moscow: Hotline – Telecom, 2017. – 296 p.