

ВОПРОСЫ ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ МЕГАПОЛИСА

Г. Й. Токтошов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630009, Новосибирск, Россия

УДК 519.7: 624.1

В данной работе рассматриваются как общие подходы при решении задач об организации инфраструктуры мегаполиса, так и решение данной проблемы путем структуризации процесса проектирования на новой методологической основе.

Ключевые слова: сети инженерных коммуникаций, коммуникационные тоннели, инфраструктура, графы, гиперсети.

In this paper on a new methodological basis the common approaches in solving problems of the organization infrastructure metropolis and solution of the problem by structuring the design process are consider.

Key words: network engineering communications, communication tunnels, infrastructure, graphs, hyper net.

В настоящее время во всем мире прослеживается динамика интенсивного развития городов-мегаполисов, для которых первоочередной задачей является создание сети инженерных коммуникаций, обеспечивающих снабжение жилых и общественных зданий теплом, водой, электроэнергией и связью. В связи с этим возникает необходимость более масштабного использования городского подземного пространства, в первую очередь, при сооружении коммуникационных тоннелей, которые обеспечивают прокладку совмещенных инженерных коммуникаций различного назначения. Совмещенные коммуникации позволяют в одном коммуникационном тоннеле одновременно прокладывать водо-, тепло- и газопроводы, электрические кабели и кабели связи, причем расстояния между различными трубопроводами могут быть значительно меньшими, чем при раздельных прокладках. Таким образом, для мегаполисов коммуникационные тоннели являются объектами стратегического назначения, обеспечивающими жизнедеятельность населения города и непрерывность функционирования инженерных коммуникаций различного назначения. Строительство коммуникационного тоннеля — это сложный многоэтапный процесс, в котором участвуют представители городского заказчика или частного инвестора, проектные, изыскательские, строительные и контролирующие организации. Одним из главных требований, предъявляемых к городским коммуникационным тоннелям, является обеспечение бесперебойного функционирования сети инженерных коммуникаций различного назначения.

На сегодняшний день подземное пространство крупных городов чрезвычайно насыщено инженерными коммуникациями различного назначения, стоимость которых весьма высока и составляет значительную долю от общей стоимости градостроительного процесса. Поэтому одной из важнейших задач проектирования и строительства городских территорий является снижение протяженности, а следовательно, стоимости построения

инженерных коммуникаций за счет их совместной прокладки в одном коммуникационном тоннеле. Совмещенная прокладка подземных коммуникаций в одном коммуникационном тоннеле в технико-экономическом отношении, как правило, более рациональна, поскольку приводит к уменьшению объемов земляных работ и снижению стоимости строительства. Таким образом, освоение подземного пространства — одно из важнейших направлений развития современной городской инфраструктуры. Опыт исследования свидетельствует о том, что в последнее время появляются зоны наиболее активного и многоуровневого использования подземной городской среды с комплексным сочетанием практических всех видов подземных сооружений, которые, в свою очередь, требуют более сложного зонирования по сравнению с поверхностными объектами. Возможности использования подземного пространства городов ограничиваются сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями, наличием уже построенных и эксплуатируемых подземных сооружений, что значительно усложняет проектирование и строительство подземных объектов, а также требует повышенных мер безопасности при их эксплуатации.

Кроме того, прокладка новых, реконструкция существующих сетей, ремонтные работы сопровождаются их разрытием, что отрицательно сказывается на дорожных покрытиях и движении транспорта и пешеходов, особенно в тех случаях, когда сети прокладывают под проезжей частью улиц. Все это требует упорядочения системы инженерных коммуникаций в одном коммуникационном тоннеле. Поскольку большая часть инженерных коммуникаций прокладывается под улицами, то одним из основных мероприятий по их организации является комплексное проектирование инфраструктуры мегаполиса, включающее и проектирование коммуникационного тоннеля для размещения подземных инженерных коммуникаций как в плане, так и в поперечном профиле.

Однако известно, что в одних и тех же условиях, располагая одной и той же информацией, разные специалисты предлагают различные варианты решений при проектировании коммуникационных тоннелей для прокладки совмещенных инженерных коммуникаций. В связи с этим интуитивное назначение вариантов в интерактивном режиме не гарантирует соответствия их оптимальному конечному результату. Даже небольшие изменения положения коммуникационного тоннеля на местности могут привести к существенным изменениям затрат на его строительство и эксплуатацию. Следовательно, проблема разработки адекватных математических моделей и методов оптимизации проектирования коммуникационных тоннелей актуальна в научном плане. Однако, до настоящего времени не разработана единая методическая база, позволяющая на стадии проектирования подземных объектов учитывать особенности эксплуатации коммуникационных тоннелей и осуществлять выбор экономически эффективного варианта их сооружения в подземном пространстве городов. Оценка вариантов сооружения коммуникационных тоннелей должна учитывать экономические эффекты от их эксплуатации и возможные ущербы в случае выхода подземных коммуникаций из строя. При этом обоснование эффективности эксплуатации подземных объектов необходимо производить с учетом как технических возможностей, так и экономической целесообразности. Выбор вариантов сооружения городских коммуникационных тоннелей без предварительной технико-экономической оценки их эксплуатации может привести к частичному или полному уничтожению материальных ценностей, недополучению продукции или упущению экономических выгод в различных сферах хозяйственной деятельности городов.

Главная особенность рассматриваемой задачи — это чрезвычайная сложность ее формализации и построения математической модели, то есть сведение проектной задачи к

математической задаче оптимизации. Дело в том, что реально приходится рассматривать целый комплекс взаимосвязанных проектных задач. Так, применительно к проектированию коммуникационного тоннеля во взаимосвязи с проектированием плана и продольного профиля должны решаться задачи проектирования поперечных профилей земляного полотна, проектирования водопропускных и других искусственных сооружений, распределения земляных масс и выбора способов производства земляных работ и др. Формализовать все это в единой математической модели крайне сложно. Практически каждая из упомянутых проектных задач, в свою очередь, является задачей оптимизации [1].

В настоящее время в ходе разработки проектов весьма активно используются современные информационные технологии. Инженеры-проектировщики в своей работе опираются на геоинформационные системы и специализированное программное обеспечение для осуществления проектно-технологических расчетов. Однако комплексный характер этих проектов, наличие сложных взаимосвязей с объектами инфраструктуры, воздействие на ход реализации строительства множества факторов, которые трудно учесть заранее, приводят к тому, что в реальности базовые параметры проекта, изначально заданные на этапе формирования технической задачи, могут существенно отличаться от итоговых. Кроме того, при выборе вариантов проектных решений заказчики, как правило, ориентируются на такие критерии, как стоимость проекта и сроки его реализации, не учитывая при этом различные риски, которые могут возникнуть при выборе той или иной технологии, а также при недостаточном учете особенностей среды, в которой реализуется строительный проект.

В настоящее время проектирование нового или развитие существующего коммуникационного тоннеля выполняется исключительно на основе нормативных документов (генеральных планов, СНиПов, ГОСТов и т. д.). Однако интуитивное назначение варианта проектного решения, основанного на нормативных документах, и опытного проектирования не гарантирует оптимальность конечного результата. Поэтому наряду с мероприятиями по разработке нормативных документов для строительства коммуникационных тоннелей и пересмотру нормативной базы проектирования необходимо совершенствовать методологические основы оценки проектных решений строительства коммуникационного тоннеля на начальных этапах проектирования, учитывающие особенности окружающей среды.

Пространственное положение коммуникационных тоннелей определяется на стадии инженерных изысканий. Инженерные изыскания — это комплекс работ по выбору трассы, отвечающей всем требованиям технических условий и требующей наименьших затрат на ее возведение и эксплуатацию [2]. Согласно этому определению, вынос на местность трасс коммуникационного тоннеля осуществляется до разработки проекта самих инженерных коммуникаций, в частности, до определения мест прокладки сетей различного назначения или взаимного расположения этих сетей в одном коммуникационном тоннеле. Однако такое теоретическое положение не соответствует действительности, поскольку оно содержит противоречие, которое заключается в следующем. Во-первых, вариантов, отвечающих всем требованиям технических условий, в действительности не существует. Во-вторых, в границах района, где намечено строительство коммуникационного тоннеля, можно выявить множество вариантов трасс, отвечающих большинству технических требований на совмещенной прокладке инженерных коммуникаций различного назначения. Таким образом, традиционный технологический процесс разработки проекта не позволяет рассматривать все многообразие возможных проектных вариантов сооружения коммуникационного тоннеля, что приводит к неоптимальным решениям и, в конечном счете, к неоправданному

расходу различных ресурсов при их строительстве и эксплуатации.

Согласно [3], суть вопроса заключается в следующем: изыскатели выносят в натуру трассу коммуникационного тоннеля до разработки проекта самих инженерных коммуникаций. Поэтому проверить качество выполненных работ по конечному результату не представляется возможным. Таким образом, каждый из специалистов-изыскателей, выполнив свою часть работы на высоком техническом и технологическом уровне, не может утверждать, что данный вариант трассы коммуникационного тоннеля оптимален с точки зрения затрат на совмещенной прокладке инженерных коммуникаций различного назначения. Поэтому традиционное разделение функций при проектировании инженерного сооружения между процессами инженерных изысканий трассы и собственно процессами проектирования становится технологическим противоречием. Выход из данной ситуации основывается на компромиссном разделении функций между процессами изысканий трасс коммуникационного тоннеля и собственно проектированием. При этом целью проведения изыскательских работ становится уже не трасса, как это принято в традиционном процессе, а информационное обеспечение в виде прикладных информационных или цифровых моделей местности (ЦММ).

Таким образом, в общем случае задачу об организации инфраструктуры мегаполиса можно рассматривать как трехуровневую иерархическую систему, состоящую из следующих уровней:

- информационное обеспечение процесса проектирования инфраструктуры мегаполиса (построение ЦММ);
- планирование траекторий (поиск трассы для прокладки) коммуникационного тоннеля;
- размещение совмещенных инженерных коммуникаций в одном коммуникационном тоннеле.

На первом иерархическом уровне, т. е. при построении модели местности, происходят изучение, частичное обогащение и переработка информации, извлекаемой в необходимом объеме, точности и содержании, требуемой для проектирования инфраструктуры мегаполиса на определенной стадии, представление данных в виде, наиболее удобном для выполнения тех или иных технологических процессов проектирования с использованием соответствующей техники. Вся информация, непосредственно полученная таким образом из фондового материала (топографические и геологические карты различных масштабов, материалы дистанционного зондирования, данные земельного кадастра, различные справочные данные и др.), называется первичной, а первичные материалы съемок, представленные в виде топографических планов и других документов, можно считать моделями местности проектирования. Эти модели позволяют при необходимости получать вторичную информацию. Новая модель, содержащая полную первичную информацию о местности или отдельных ее элементах, называется вторичной или информационной, она в совокупности определяет инженерно-экономическую и информационную модели местности [4].

Для цифрового моделирования местности необходимо иметь дискретное представление заданной территории, на которой предполагается вести строительство инженерной коммуникации. Удобным инструментом дискретизации заданной территории является сеточная аппроксимация, суть которой заключается в моделировании заданной территории сеткой с конечным множеством элементов. Построение цифровой модели местности состоит из следующих этапов [5]:

- 1) подготовка исходных данных (изучение природных и ситуационных особенностей заданной территории);
- 2) выбор типа сетки, применяемой для моделирования местности;
- 3) присвоение соответствующим элементам сетки числовых значений природных и ситуационных характеристик заданной территории на основе исходных данных;
- 4) применение полученной расчетной сетки к решению поставленной задачи и анализу полученных результатов.

Таким образом, в методах сеточной аппроксимации чаще всего создается не сама поверхность, а только ее дискретное представление на плоскости: интересующая проектировщика территория разбивается некоторой сеткой на элементарные ячейки, каждому элементу (узлам и ветвям) которой придают соответствующие стоимостные значения прокладки коммуникационного тоннеля на данном участке местности. В результате получается дискретное представление заданной территории в виде ЦММ для альтернативного решения проблемы выбора маршрута в пользу обхода участка местности с высокой стоимостью строительных работ, либо в пользу прохождения маршрута по этому участку, если его обход связан со значительным удлинением маршрута. При построении ЦММ целесообразно из рассмотрения сразу же исключить объекты и участки местности, прокладка коммуникационного тоннеля через которые либо заведомо нецелесообразна, либо вовсе невозможна, а также устанавливать фиксированные точки и направления местности, прокладка тоннеля через которые обязательна.

На втором иерархическом уровне на основе модели местности, построенной на первом иерархическом уровне, осуществляется процесс поиска трассы для прокладки коммуникационного тоннеля. Для поиска такой трассы на графе ЦММ могут использоваться любые известные алгоритмы поиска пути на взвешенном графе. Самым известным и распространенным алгоритмом поиска кратчайшего пути является алгоритм Дейкстры [6]. На практике же, с целью экономии вычислительных ресурсов обычно используются эвристические модификации алгоритма Дейкстры — алгоритмы семейства A*, WA*, BeamSearch и другие [7]. Указанные алгоритмы основаны на принципе итерационного обхода клеток графа до выполнения некоторого критерия. В процессе обхода для каждой клетки рассчитывается и сохраняется в оперативной памяти ряд числовых значений, которые впоследствии используются для формирования решения. Именно числом рассмотренных клеток и определяется вычислительная нагрузка этих алгоритмов. И, как показывает теоретический и практический анализ, даже эвристические алгоритмы поиска, использующие „лучшую“ эвристику (а именно — метрику графа ЦММ), не в состоянии избежать рассмотрения чрезмерного количества клеток при решении большинства практических задач.

Таким образом, задача планирования траекторий (поиска трасс) на плоскости традиционно рассматривается как задача поиска пути на взвешенном графе, вершинам которого соответствуют координаты точек пересечения ребер применяемого типа сетки, а весам ребер — соответствующие расстояния.

Выбор наиболее целесообразного варианта трассы для прокладки коммуникационных тоннелей является прогрессивным направлением в организации подземного хозяйства современного города. Способ размещения подземных инженерных коммуникаций выбирают с учетом строительных и эксплуатационных затрат, особенностей местных условий и т. п. Исследование показывает, что размещение инженерных коммуникаций в общих тоннелях микрорайонов больших и крупных городов экономически целесообразно при повышен-

ной этажности зданий и большой численности их населения. Коммуникационные тоннели обладают рядом преимуществ, к основным из которых следует отнести:

- 1) сокращение или полное исключение разрытия улиц при строительстве и реконструкции подземных коммуникаций, а также эксплуатационных работах на сетях;
- 2) возможность размещения группы коммуникаций в тоннелях, занимающих в плане и разрезе улицы сравнительно небольшое место;
- 3) резкое улучшение условий эксплуатации подземных коммуникаций, размещаемых в общих тоннелях, благодаря возможности регулярного надзора и принятия профилактических мер без разрытия улиц;
- 4) не столь резко проявляемые процессы коррозии в общих тоннелях по сравнению с прокладкой трубопроводов и кабелей в грунте.

Однако некоторыми недостатками строительства коммуникационных тоннелей и размещения в них подземных инженерных коммуникаций являются:

- 1) единовременные значительные капиталовложения в строительство коммуникационных тоннелей;
- 2) затруднение или техническая невозможность размещения в коммуникационных тоннелях самотечных трубопроводов (канализации и водостоков) и газопроводов.

Технико-экономические обоснования целесообразности строительства коммуникационных тоннелей включают сравнительный анализ строительной стоимости прокладки инженерных коммуникаций в общем тоннеле и просто в грунте. При этом учитывают не только стоимость земляных работ и сооружения самого коммуникационного тоннеля, но и стоимость подземных инженерных коммуникаций, так как при прокладке их в грунте или в тоннеле применяют различные конструкции инженерных коммуникаций. В коммуникационном тоннеле стоимость инженерных коммуникаций ниже, так как исчезает необходимость в сооружении ряда смотровых колодцев, отпадает необходимость устройства каналов для трубопроводов тепловых сетей, часть кабельных сетей устраивают с применением освинцованных кабелей вместо бронированных.

В коммуникационных тоннелях допускается размещение следующих подземных инженерных коммуникаций:

- 1) кабелей связи всех видов (телефона, радиовещания, сигнализации различного назначения и т. п.);
- 2) кабелей электросети переменного и постоянного тока напряжением не более 1000В (силовые, бытового потребления тока, уличного освещения, городского электротранспорта и т. п.);
- 3) трубопроводов городской сети водоснабжения, исключая крупные водоводы;
- 4) трубопроводов тепловых сетей;
- 5) трубопроводов-коллекторов канализационной сети при напорном режиме работы (практически это происходит в сравнительно редких случаях, так как обычно канализационные трубы являются самотечными).

К тому же в коммуникационном тоннеле могут быть размещены специальные сети: нефтепроводы, трубы пневматической почты, поливочный водопровод и т. д. В общем случае, сети коммуникационных тоннелей с использованием сооружений линейного характера (коллекторы, траншеи, коммуникационные тоннели) связывают узлы (камеры, колодцы, диспетчерские и т. п.). Все элементы сети коммуникационных тоннелей имеют реальный характер, т. е. они будут построены на основе соответствующих СНиП, как правило, под землей, открытыми или закрытыми способами.

На третьем иерархическом уровне решается задача совмещенного размещения инженерных коммуникаций в одном коммуникационном тоннеле. Здесь необходимо учесть, что совмещенную прокладку подземных инженерных коммуникаций проектируют строго с соблюдением установленных правил и норм, касающихся взаимного расположения в плане (по горизонтали) и глубины заложения (по вертикали) инженерных коммуникаций различного назначения. При этом должны учитываться минимально допустимые расстояния по горизонтали между соседними инженерными подземными сетями при их параллельном размещении и минимально допустимые расстояния по вертикали при пересечении инженерных коммуникаций между собой [8].

Основными элементами третьего иерархического уровня являются физические линии (трубы, кабели и т. п.) и узлы инженерных коммуникаций (источники сырья, потребители, станции, подстанции, распределительные пункты и т. п.). Физические линии будем называть каналом передачи целевого продукта (информация, энергия, продукт), связывающим узлы различного характера, например, источник с источником или источник с потребителем. Соединение двух различных узлов в рамках одного и того же коммуникационного тоннеля назовем простым каналом. Если физические линии связывают узлы, размещенные в различных коммуникационных тоннелях, то они называются составными. Таким образом, на этом иерархическом уровне фактически определяются состав и структура совмещенно прокладываемых в одном коммуникационном тоннеле инженерных коммуникаций.

Таким образом, задача об организации инфраструктуры мегаполиса является многоуровневой иерархической задачей оптимизации. Использование графов при решении такого рода задач часто налагает существенные ограничения как на математические модели, так и на решающие алгоритмы, что в конечном итоге отрицательно сказывается на качестве получаемых решений. Часто более предпочтительным с точки зрения универсальности моделирования является использование нестационарных S-гиперсетей [9], учитывающих иерархичность, вложения одной подсистемы в другую, а также их структурные изменения во времени. Гиперсети не только более естественно описывают названные выше инженерные задачи, но и позволяют решать некоторые задачи дискретной оптимизации, сведение которых к классическим графикам либо невозможно, либо порождает очень сложные модели. Однако, несмотря на значительно более широкие возможности, предоставляемые гиперсетями, сложность машинной реализации самих моделей и алгоритмов, работающих над ними, также выше. В этой связи особенно остро встает проблема построения специализированных методов и алгоритмов решения задач оптимизации инфраструктуры мегаполиса, осуществляющих поиск на основе теории S-гиперсетей.

Список литературы

1. Струченков В. И. О методологии компьютерного проектирования трасс линейных сооружений // САПР и графика. 2013. № 7. С. 26–30.
2. Левчук Г. П. Прикладная геодезия. Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ / Г. П. Левчук, В. Е. Новак, В. Г. Конусов. М.: Недра, 1981.
3. Ловягин В. Ф. Геоинформационные технологии в инженерных изысканиях трасс линейных сооружений. Новосибирск: СГГА, 2010.
4. Райфельд В. Ф. Инженерно-геодезические работы при изысканиях линейных сооружений. М.: Недра, 1983.

5. Токтошов Г. Ы. Построение цифровой модели местности для задачи размещения инженерных коммуникаций / Материалы Российской научно-технич. конф. „Обработка информационных сигналов и математическое моделирование“. Новосибирск, СибГУТИ, 23-24 мая 2013 г. С. 155–156.
6. DIJKSTRA E. W. A note on two problems in connexion with graphs. // Numerische Mathematik. 1959. N 1. P. 269–271.
7. HART P., NILSSON N., RAPHAEL B. A formal basis for the heuristics determination of minimum costs path. // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. N 2.
8. Токтошов Г. Ы. Гиперсети в моделировании и оптимизации совмещенной прокладки подземных инженерных коммуникаций // Проблемы информатики. 2014. № 1. С. 15–23.
9. Попков В. К. Структурные модели многослойных нестационарных систем / Труды X Международной Азиатской школы-семинара „Проблемы оптимизации сложных систем“. Киргизия, оз. Иссык-Куль. 25 июля-5 августа 2014 г. Ч. II. С. 562–573.

*Токтошов Гулжигит Ысакович – канд. техн. наук, младш. науч. сотр.
Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
e-mail: tgi_tok@rambler.ru, тел.: 8-952-913-96-25*

Дата поступления – 19.01.2015