

УДК 625.72.001.63

## ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕСТНОЙ СЕТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

**Жуков В.И., Копылов С.В.**

*ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, e-mail: kopylovsergey@inbox.ru*

Существующие стандарты по проектированию сетей автомобильных дорог не позволяют рационально проектировать и развивать дорожную сеть в условиях Крайнего Севера. Это наглядно подтверждает текущее состояние сети автомобильных дорог в Республике Саха (Якутия). На сегодняшний день в Якутии около 70% населения не имеют круглогодичной транспортной связи по автомобильным дорогам с твердым покрытием. В связи с этим обеспечение транспортной доступности населенных пунктов республики является актуальным. При разработке математической модели принято, что основным требованием к оптимальной сети автомобильных дорог является обеспечение потребителей транспортной доступностью. На основе теории графов разработана математическая модель проектирования местной сети автомобильных дорог, учитывающая специфические условия Республики Саха (Якутия).

**Ключевые слова:** местная сеть автомобильных дорог, теория графов, транспортная доступность, автозимники

## JUSTIFICATION OF MATHEMATICAL MODEL OF DESIGN OF THE LOCAL NETWORK OF HIGHWAYS IN THE CONDITIONS OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

**Zhukov V.I., Kopylov S.V.**

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: kopylovsergey@inbox.ru*

The existing standards on design of networks of highways don't allow to project and develop rationally a road network in the conditions of Far North. It visually represents current state of a network of highways in the Republic of Sakha (Yakutia). Today in Yakutia about 70% of the population have no year-round transport communication on highways with a hard coating. In this regard ensuring transport availability of settlements of the republic is topical issue. When developing mathematical model it is accepted that the main requirement to an optimum network of highways is providing consumers with transport availability. On the basis of the theory of counts the mathematical model of design of a local network of highways considering specific conditions of the Republic of Sakha (Yakutia) is developed.

**Keywords:** local road network, graph theory, transport accessibility, winter snow roads

Руководством страны принят ряд решений, направленных на ускорение социально-экономического развития Дальнего Востока и Сибири. В Указе Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 г. № 596 «О долгосрочной государственной экономической политике» поставлена задача обеспечения транспортными связями труднодоступных территорий в Дальневосточном федеральном округе [2].

Решение поставленной задачи в условиях Республики Саха (Якутия) без соответствующей для региона научно обоснованной базы является трудным, но в то же время очень актуальным. Для обеспечения транспортной доступности населенных пунктов Республики Саха (Якутия) необходимо разработать научно обоснованную методику проектирования местной сети автомобильных дорог.

В Республике Саха (Якутия) находятся 629 населенных пунктов. Из них круглогодичной транспортной связью (дорогами с твердым покрытием) обеспечены только 46 населенных пунктов. Эксплуатационная

протяженность сети автомобильных дорог общего пользования к концу 2014 года составляет 35 656 км. Из них к дорогам с твердым покрытием относятся 30%, остальные 70% дорог представлены автозимниками, частично имеющими грунтовое покрытие.

Одной из причин крайне недостаточной транспортной доступности населенных пунктов Республики Саха (Якутия) является то, что действующие методы проектирования сети автомобильных дорог в большей степени ориентированы на центральные и западные регионы страны с более развитой сетью дорог и относительно малыми территориями и не отражают в полной мере специфику проектирования сети автомобильных дорог местного значения в Республике Саха (Якутия) [1, 3, 4, 6, 7].

В связи с этим крайне актуальной является разработка математической модели проектирования местной сети автомобильных дорог для обеспечения транспортной доступности населенных пунктов с учетом социально-экономического положения в районах Республики Саха (Якутия).

**Цель исследования** – разработка математической модели проектирования местной сети автомобильных дорог в специфических условиях Республики Саха (Якутия).

Местная сеть автомобильных дорог должна способствовать социально-экономическому развитию района исследования.

Поэтому, разработка математической модели проектирования местной сети автомобильных дорог в условиях Якутии должна опираться в первую очередь на создание круглогодичной транспортной связи по автомобильным дорогам с твердым покрытием между районным центром и сельскими населенными пунктами независимо от интенсивности движения.

Исходя из этого при проектировании местной дорожной сети необходимо учитывать:

- потребность населения в ежедневных поездках;
- внетранспортные убытки района из-за отсутствия круглогодичной транспортной связи по автомобильным дорогам с твердым покрытием;
- долю населения, проживающего в зоне транспортной дискриминации;
- сложившуюся сеть автомобильных дорог района исследования.

Кроме того, выдвигаются требования для проектирования местной сети автомобильных дорог, требующей улучшения:

- участки дорог, в зоне тяготения которых проживает наибольшая численность населения;
- участки дорог в местах деятельности предприятий сельскохозяйственного назначения;
- участки дорог, по которым пролегает путь жизнеобеспечивающих товаров и грузов;
- участки дорог с неудовлетворительными транспортно-эксплуатационными характеристиками;
- участки дорог с наибольшим уровнем загрузки;
- участки дорог, в зоне тяготения которых на перспективу планируется создание или развитие производственных мощностей, заводов, образовательных учреждений, медицинских учреждений, домов культуры и рекреационных мест.

Для потребителя автомобильных дорог одним из важных факторов, достоверно характеризующих качество и эффективность работы сети автомобильных дорог, а также работы грузопассажирских перевозок между корреспондирующими пунктами, являются транспортно-эксплуатационные показатели автомобильной дороги.

Транспортно-эксплуатационные показатели сети автомобильных дорог характеризуются рядом следующих показателей: интенсивность

движения; объем перевозок; состав движения; пропускная способность; провозная способность дороги; коэффициент загрузки дороги движением; скорость движения; время в пути; тип дорожного покрытия [5].

Таким образом, для разработки математической модели проектирования местной сети автомобильных дорог с учетом требований потребителей следует рассматривать транспортно-эксплуатационные показатели. Поскольку качество и эффективность работы сети автомобильных дорог являются одними из главных составляющих развития сети автомобильных дорог, их можно рассматривать в качестве функции транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильных дорог.

При разработке рабочей модели не требуется учитывать все транспортно-эксплуатационные показатели. В рамках исследования достаточно принять за основные: скорость движения; время в пути; тип дорожного покрытия.

В дальнейшем принятые транспортно-эксплуатационные показатели рассматриваются в качестве весовых характеристик транспортных связей.

Учитывая ограничения по финансовым возможностям, проектирование местной сети дорог следует проводить поэтапно и отдельно по транспортным связям. Улучшение транспортно-эксплуатационных характеристик транспортных связей проводится путем перевода низшего типа покрытия в переходный тип покрытия дороги.

Проектирование местной сети автомобильных дорог целесообразно проводить в два этапа:

- выявление транспортных связей с наименьшими весовыми характеристиками;
- построение местной сети дорог на основе улучшения весовых характеристик транспортных связей.

Отбор транспортных связей с наименьшими весовыми характеристиками проводится на основе теории графов. Сеть автомобильных дорог представляется в виде графа, задаваемого некоторым множеством вершин и ребер. При этом вершины соответствуют населенным пунктам, а ребра – автомобильным дорогам (транспортным связям).

Задача проектирования местной сети автомобильных дорог заключается в том, чтобы связать данное множество населенных пунктов (вершин графа) множеством автомобильных дорог (ребер) с наименьшими весовыми характеристиками [6].

Граф  $G$  представлен парой  $(X, U)$  [6].

$$G = (X, U), \quad (1)$$

где  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – множество вершин интерпретирующих населенные пункты.

При этом населенные пункты не являются взвешенными, то есть не имеют весовых характеристик;  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  – множество ребер, интерпретирующих автомобильные дороги, составляющие опорную сеть района. При этом ребра являются взвешенными, то есть автомобильные дороги имеют численные весовые характеристики.

Поскольку автомобильная дорога имеет прямое и обратное направление, весовые характеристики ребер графа будут одинаковыми в обоих направлениях. Отсюда следует, что весовые характеристики ребер в прямом направлении  $U_{ij}$  и обратном направлении  $U_{ji}$  одинаковы:

$$U_{ij} = U_{ji} \quad (2)$$

Исходя из условия (2), граф  $G$  является симметричным и неориентированным. При выявлении транспортных связей с наименьшими весовыми характеристиками рассматриваются только межпоселенческие автомобильные дороги, то есть автомобильные дороги внутри населенных пунктов не рассматриваются.

Весовые характеристики любого ребра  $u_n$ ,  $n \in [1, \dots, M]$  интерпретируют транспортные связи, задаются набором показателей:

– средневзвешенная скорость движения

$$V_{ij} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\};$$

– время в пути (средневзвешенные затраты времени на пассажира и грузоперевозки)

$$t_{ij} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\};$$

– тип дорожного покрытия

$$P_{ij} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}.$$

Весовые характеристики, интерпретирующие комплекс всех показателей, характеризующих транспортно-эксплуатационное состояние, обозначаются через  $K_{ij}$ .

Задача определения транспортных связей с наименьшими весовыми характеристиками заключается в построении первоначального графа  $(X, U)$ . Граф  $(X, U)$ , отображающий опорную сеть автомобильных дорог района исследования, представлен на рис. 1.

Пользуясь данными, представленными графом  $(X, U)$ , строится граф  $(Y, V)$ , интерпретирующий транспортные связи с наименьшими весовыми характеристиками (рис. 2).

Сплошной линией показаны транспортные связи с наименьшими весовыми характеристиками. Пунктирной линией – с удовлетворительными весовыми характеристиками.

Для определения транспортных связей со слабыми весовыми характеристиками устанавливаются численные характеристики между каждой парой смежных точек (корреспондирующих пунктов), то есть устанавливаются весовые характеристики ребер (транспортных связей) графа  $(X, U)$ .

Наиболее полно весовые характеристики транспортных связей между каждой парой корреспондирующих пунктов в графе  $(X, U)$  определяются с помощью условной приведенной длины по следующей формуле [6]:

$$L_{\text{прив}} = l_{ij} \alpha, \quad (3)$$

где

$$\alpha = \frac{aD}{Q} + bT, \quad (4)$$

$L_{\text{прив}}$  – приведенная длина транспортных связей;  $l_{ij}$  – расстояние между вершинами, км;  $D$  – дорожные затраты, тыс. руб.;  $T$  – транспортная составляющая себестоимости перевозок, тыс. руб.;  $Q$  – объем перевозимых грузов, т;  $a$  и  $b$  – коэффициенты для учета суммарных дорожных затрат.

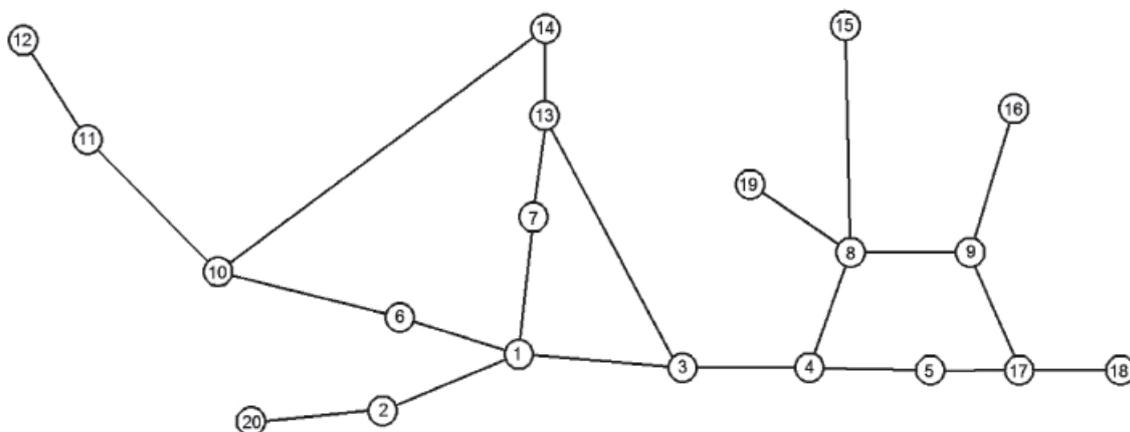


Рис. 1. Граф  $(X, U)$ , представляющий схему автомобильных дорог района исследования: 1 – 20 – корреспондирующие пункты

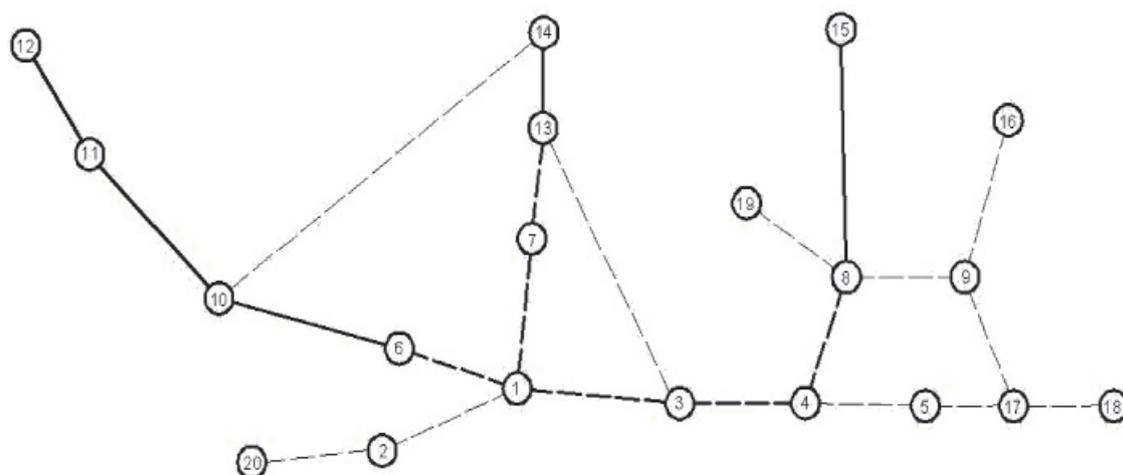


Рис. 2. Граф  $(Y, V)$ , представляющий участки автомобильных дорог района исследования с наименьшими весовыми характеристиками:  
1 – 20 – корреспондирующие пункты

В практике определения приведенной длины ( $L_{\text{прив}}$ ) широко применяется упрощенная формула следующего вида [6]:

$$L_{\text{прив}} = \frac{l_{ij}}{Q}, \quad (5)$$

где  $l_{ij}$  – расстояние между вершинами, км;  
 $Q$  – объем перевозимых грузов, т.

Основными величинами для определения приведенной длины являются расстояние между корреспондирующими пунктами и соответствующий объем перевозимых грузов. Поскольку в данном случае в качестве весовых характеристик выбраны скорость движения, время в пути и тип дорожного покрытия, то зависимость (5) примет следующий вид:

$$L_{\text{прив}} = \frac{l_{ij}}{V_{ij} t_{ij} P_{ij}}; \quad (6)$$

$$K_{ij} = V_{ij} t_{ij} P_{ij}, \quad (7)$$

где  $V_{ij}$  – средневзвешенная скорость движения между вершинами, км/ч;  $t_{ij}$  – время в пути между вершинами, ч;  $P_{ij}$  – тип покрытия, тогда

$$L_{\text{прив}} = \frac{l_{ij}}{K_{ij}}, \quad (8)$$

где  $K_{ij}$  – комплекс транспортно-эксплуатационных характеристик между вершинами.

Таким образом, весовая характеристика автомобильной дороги между вершинами определяется как отношение расстояния между корреспондирующими пунктами к комплексу показателей характеризующих транспортно-эксплуатационное состояние участка автомобильной дороги.

### Заключение

С учетом сложившейся сети автомобильных дорог местного значения Республики Саха (Якутия) были приняты транспортно-эксплуатационные показатели, наиболее полно характеризующие требования потребителей к оптимальной сети автомобильных дорог.

На основе теории графов была обоснована математическая модель для проектирования местной сети автомобильных дорог в условиях Республики Саха (Якутия), которая позволяет строить и оптимизировать транспортные связи (участки автомобильных дорог). Проектирование сети местных автомобильных дорог проводится по очередности, исходя из транспортно-эксплуатационного состояния участков дорог. Это позволяет рационально распределить капитальные вложения, выделенные для повышения транспортной доступности района исследования.

В дальнейшем полученная математическая модель будет применяться для разработки методики проектирования местной сети автомобильных дорог в условиях Республики Саха (Якутия).

**Список литературы**

1. СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85\*. – М., 2012.
2. Доклад Министра транспорта РФ на заседании Правительственной комиссии по вопросам развития промышленности, технологий и транспорта. URL: <http://www.aviaport.ru/digest/2008/02/01/135810.html>. (дата обращения: 23.10.2014).
3. Паршиков В.А. О построении местной дорожной сети // Развитие сети автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1971. – С. 71–101.
4. Рекомендации по проектированию сети автомобильных дорог областного и местного значения. – М., 1979. – 40 с.
5. Сильянов В.В., Домке Э.Р. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц. – М.: Академия, 2008. – 342 с.
6. Хомяк Я.В. Проектирование оптимальных сетей автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1969. – 144 с.
7. Ярмолинский В.А. Оптимизация развития региональной автодорожной сети Дальневосточного федерального округа. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 236 с.

**References**

1. SP 34.13330.2012 Avtomobil'nye dorogi. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.05.02-85\*. M., 2012.
2. Doklad Ministra transporta RF na zasedanii Pravitel'stvennoj komissii po voprosam razvitija promyshlennosti, tehnologij i transporta. URL: <http://www.aviaport.ru/digest/2008/02/01/135810.html>.

3. Parshikov V.A. O postroenii mestnoj dorozhnoj seti // Razvitie seti avtomobil'nyh dorog. – M.: Transport, 1971. pp. 71–101.
4. Rekomendacii po proektirovaniju seti avtomobil'nyh dorog oblastnogo i mestnogo znachenija. – M., 1979. – 40 p.
5. Sil'janov V.V., Domke Je.R. Transportno-jekspluatacionnye kachestva avtomobil'nyh dorog i gorodskih ulic. M.: Akademija, 2008. 342 p.
6. Homjak Ja.V. Proektirovanie optimal'nyh setej avtomobil'nyh dorog. M.: Transport, 1969. 144 p.
7. Jarmolinskij V.A. Optimizacija razvitija regional'noj avtodorozhnoj seti Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga. Vladivostok: Dal'nauka, 2005. 236 p.

**Рецензенты:**

Инжутов И.С., д.т.н., профессор кафедры строительных конструкций и управляемых систем инженерно-строительного института, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск;  
 Емельянов Р.Т., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой инженерных систем зданий и сооружений, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.  
 Работа поступила в редакцию 09.02.2015.