УДК 658.7

ОПТИМАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Асп. ЦАРЕНКОВА И. М., канд. экон. наук КИСЕЛЬ Т. Р.

Белорусский национальный технический университет

Дорожная сеть Республики Беларусь органически вписывается в европейскую через Польшу. Международные автомобильные перевозки в Беларуси в значительной степени определяются тенденциями международной торговли, формирующимися в евразийском регионе. Основной поток автомобильного транспорта через территорию Республики Беларусь идет по двум трансъевропейским коридорам, определенным по международной классификации под номерами II и IX, общей протяженностью 1513 км. Требования Европейского сообщества, предъявляемые к инфраструктуре автомобильных транспортных коридоров, довольно жесткие. Из-за существующего состояния дорожной сети ежегодно вводятся ограничения скорости на движение автомобильного транспорта, выполняющего международные перевозки, в том числе и по международным транспортным коридорам IX и IXб. В программе «Дороги Беларуси» на 2006–2015 гг. намечены дальнейшие развитие и ремонт автомобильных дорог на направлениях международных транспортных коридоров, на что планируется направить 1814 млрд руб [1]. Намечено выполнить реконструкцию 79 км и капитальный ремонт 1332 км автомобильных дорог. В результате все автомобильные дороги на направлениях международных транспортных коридоров к концу 2015 г. обеспечат пропуск транспортных средств с нагрузкой на одиночную ось 11,5 т [1]. В связи с этим представляется целесообразным определить оптимальную стратегию распределения инвестиций в реконструкцию участков дорог для достижения максимального эффекта.

Многие ученые предлагают оценить затраты времени на движение и преодоление всех препятствий на маршруте транспортного средства моделированием времени движения автомобиля. В [2] уделено большое внимание моделированию перевозочного процесса на примере международных автомобильных перевозок грузов [2], в [3] исследовано влияние скоростей движения потоков автомобилей в различных дорожных условиях, в [4] рассчитаны технико-экономические показатели работы автомобилей при разработке плана перевозок [4].

Сегодня проблема снятия ограничений скорости решается с учетом проведения реконструкции международных транспортных коридоров и особенностей их работы в Беларуси на основе системного анализа. С целью исследования предпосылок повышения скоростей движения автомобилей на участках международных транспортных коридоров были проанализированы основные технические параметры транспортных коридоров (техническое оснащение, параметры плана и профиля, грузонапряженность, пропускная способность, скорости движения и т. д.) и их соответствие европейским требованиям, а также тенденции роста скоростей. Скорость определяет конечный результат перевозок, а потому ее анализ представляет особый интерес.

Транспортный коридор, который сегодня требует реконструкции, характеризуется совокупностью внешних связей с международной сетью автомобильных дорог, другими видами транспорта, естественной средой.

Представим транспортный коридор в виде набора элементов M, и тогда задача состоит в нахождении такого набора элементов реконструированной системы M' ($M' \subseteq M$), который даст сокращение времени движения Δt не меньше необходимого ΔT при минимальной стоимости реконструкции K:

$$M' \subseteq M \to \begin{cases} \Delta t(M') \geq \Delta T; \\ K(M') \to \min. \end{cases} \qquad (1)$$

Система M, в свою очередь, раскладывается на подсистемы:

$$M = \{H_r, H_{r+1}, \ldots, H_q\}; \quad (2)$$

$$l(M) = \sum_{k=r}^{q} l(H_k);$$

$$k \in [r; q],$$

где H – подсистема 1-го уровня (обособленный участок – участок автомобильной дороги, который начинается и заканчивается крупными населенными пунктами); k – номер обособленного участка (H) от r до q во множестве M; l – физическая длина. Тогда:

$$\Delta t(M') = \sum_{k=r}^{q} f_T(H'_k) - D; \quad (3)$$

$$K(M') = \sum_{k=r}^{q} K(H'_k),$$

где D – перечень участков с ограниченной скоростью движения автомобиля, которые не учтены в структуре подсистемы H; f_T – функция определения времени движения автомобиля.

Подсистема H состоит из множества подсистем 2-го уровня (Ω – участок автомобильной дороги с соответствующим ограничением скорости)

$$H_j = \{\Omega_{p,j}, \Omega_{p+1,j}, \ldots, \Omega_{z,j}\} \quad (4)$$

где j – номер участка автомобильной дороги с соответствующим ограничением скорости (Ω) от p до z во множестве H.

Подсистема 2-го уровня (Ω) – это множество объектов ω, которые ограничивают скорость движения и подлежат реконструкции (кривая, участок земляного полотна, дефектное искусственное сооружение, переезд, участки с плохой видимостью, пересечения с другими автомобильными дорогами в одном уровне, малые населенные пункты и т. п.):

$$\Omega_{j,k} = \{\omega_{1,j,k}, \omega_{2,j,k}, \ldots, \omega_{i,j,k}, \ldots, \omega_{n,j,k}\}; \quad (5)$$

$$\omega = [l, [v]_s, K_s], s = [1; m];$$

$$\exists s \in [1; m] K_s = 0, [v]_s = \min\{[v]\};$$

$$l(\Omega_{j,k}) \geq \sum_{i=1}^{n} l(\omega_i),$$

где i – номер объекта реконструкции ω от 1 до n во множестве Ω.

Объект ω характеризуется длиной l и стоимостью реконструкции K_s для достижения допустимой скорости $[v]_s$, s – вариант из конечного количества возможных m.

Для подсистемы 2-го уровня нужно найти оптимальный набор объектов, которые подлежат реконструкции на каждом участке:

$$\Omega'_{j,k} \subseteq \Omega_{j,k}; \quad (6)$$

$$\Omega'_{j,k} =$$

$$= \{\omega_{i,j,k} \in \Omega_{j,k} | \Delta t(\Omega'_{j,k}) \to \max, K(\Omega'_{j,k}) \to \min\};$$

$$\Delta t(\Omega'_{j,k}) =$$

$$= f_T(\Omega_{j-1,k}, \Omega_{j,k}, \Omega'_{j,k}, \Omega'_{j+1,k}, \Pi_{j,k} : \Pi_{j,k} \setminus \Omega_{j,k} = \theta);$$

$$K(\Omega'_{j,k}) = \sum K(\omega_{i,j,k} \in \Omega'_{j,k}).$$

При этом достоверное сокращение времени движения от реконструкции может быть получено в результате выполнения расчетов f_T, которые учитывают состояние участка автомобильной дороги до $\Omega_{j,k}$ и после $\Omega'_{j,k}$ реконструкции, результаты на предшествующем $\Omega'_{j-1,k}$ и последующем $\Omega'_{j+1,k}$ участках, а также параметры участка $\Pi_{j,k}$, которые не включены в объекты возможной реконструкции.

Необходимо выполнить теоретические исследования и разработать метод оптимального переустройства автомобильной дороги для снятия ограничений скорости и, следовательно, повышения пропускной способности дороги.

Из-за ограничения финансовых и материально-технических ресурсов возникает задача выбора оптимальной последовательности реконструкции автомобильной дороги. Решение задачи усложнит необходимость рассмотрения взаимозависимых участков (объектов), для которых характерным является то, что сокращение времени движения автомобиля на каждом объекте после устранения ограничения скорости движения не равняется выигрышу во времени, если снять все ограничения скорости. То есть критерий не является аддитивным, и получить достоверные данные можно только, выполнив расчеты при разных комбинациях снятия ограничений скорости (ликвидации барьерных мест), что невозможно осуществить прямым перебором вариантов.

Представим участок автомобильной дороги как набор объектов ω_i. Пусть Ω – множество объектов ω_i. Тогда задача сводится к определению такого подмножества Ω', чтобы после реконструкции выбранных объектов обеспечивалось сокращение времени не меньше заданного при минимальной стоимости реконструкции.

Нужно найти $\Omega' \in \Omega$ так, чтобы

$$\begin{cases} \Delta t(\Omega') \ge \Delta T; \\ K(\Omega') \to \min, \end{cases} \tag{7}$$

где $\Delta t(\Omega')$ – сокращение времени движения за счет реконструкции набора объектов Ω'; $K(\Omega')$ – стоимость реконструкции набора объектов Ω'; $K(\Omega') = \sum\limits_{\omega \in \Omega} C_{\text{o}}(\omega)$; C_{o} – стоимость реконструкции объекта для перехода от скорости $v_{\min}$ (существующее состояние объекта) к скорости $v_{\max}$ (снятие ограничения скорости).

Если принять критерий $\Delta t(\Omega')$ аддитивным, т. е. $\Delta t(\Omega') = \sum\limits_{\omega \in \Omega'} \Delta t(\omega)$, то решением будет множество $\Omega'(\mu) = \{\omega \in \Omega : K(\Omega') - \mu \Delta t(\omega) \le 0\}$. Далее формируется множество Ω', которое содержит и элементы множества Ω, упорядоченные по возрастанию отношения $\dfrac{K(\omega)}{\Delta t(\omega)}$ (назовем их «показатель использования инвестиций»):

$$\Omega'(\mu) = \left\{ \omega \in \Omega' : \frac{K(\omega)}{\Delta t(\omega)} \le \mu \right\}.$$

Множитель μ определяет, на каком объекте множества $\Omega*$ необходимо остановиться при формировании подмножества Ω', и находится из неравенства $\sum\limits_{\omega \in \Omega'(\mu)} \Delta t(\omega) \ge \Delta T$.

Так как на самом деле функция $\Delta t(\Omega')$ не является аддитивной, то для решения этого вопроса вводятся функции $\Delta t_{\text{н}}(\Omega')$ – полуаддитивная снизу и $\Delta t_{\text{и}}(\Omega)$ – полуаддитивная сверху:

$$\Delta t_{\text{н}}(\Omega') = \sum_{\omega = \Omega`} \Delta t_{\text{н}}(\omega),$$

где

$$\Delta t_{\text{н}}(\omega) = f_T(\Omega* = \{\ \}) - f_T(\Omega* = \omega);$$

$$\Delta t_{\text{и}}(\Omega') = \sum_{\omega = \Omega'} \Delta t_{\text{и}}(\omega),$$

где $\Delta t_{\text{и}}(\omega) = f_T(\Omega* = \Omega \setminus \omega) - f_T(\Omega* = \Omega)$.

Чтобы иметь возможность подобрать оптимальное соотношение между сокращением времени движения и необходимыми для этого средствами, надо получить решение для всех возможных ΔT. Тогда решается задача с функцией $\Delta t_{\text{н}}(\omega)$ для $\Delta t(\Omega'_{\text{н}}) \in [\Delta t(\Omega'_{\text{н}} = \{\ \}); \Delta t(\Omega'_{\text{н}} = \Omega)]$ и уточняется $\Delta t(\Omega'_{\text{н}})$ расчетами. Результатом является множество A, элемент которого состоит из набора объектов $\Omega_{\text{н}}$ $(\Omega'_{\text{н}} = \Omega'_{\text{н}} \setminus \omega_k)$ при $\Delta t_T(\Omega_{\text{н}} > \Delta T$, где ω_k – последний элемент подмножества $\Omega'_{\text{н}}$, сокращения времени $\Delta t(\Omega'_{\text{н}})$ и их стоимости $K(\Omega'_{\text{н}})$, причем элементы множества A упорядочены по $\Delta t(\Omega'_{\text{н}})$ и $K(\Omega'_{\text{н}})$.

Формируется множество B аналогично множеству A в предыдущем случае, но с использованием функции $\Delta t_{\text{в}}(\omega)$, причем $(\Omega'_{\text{в}} = \Omega_{\text{в}} \setminus \omega_j)$ при $\Delta t_T(\Omega'_{\text{в}}) < \Delta T$, где ω_k – элемент множества $\Omega*$, который следует за последним элементом в подмножестве $\Omega'_{\text{в}}$.

Формируется множество $C = A \cup B$, упорядоченное по величине $\Delta t(\Omega')$. Из множества C исключаются i-е элементы, которые не удовлетворяют условию $K(\Omega'_{i-1}) < K(\Omega'_i) < K(\Omega'_{i+1})$. Сформированное множество и является конечным результатом.

В результате применения изложенного алгоритма для решения задачи повышения скорости движения (снятия ограничений скорости) может быть получена зависимость стоимости реконструкции от сокращения времени движения (рис. 1).

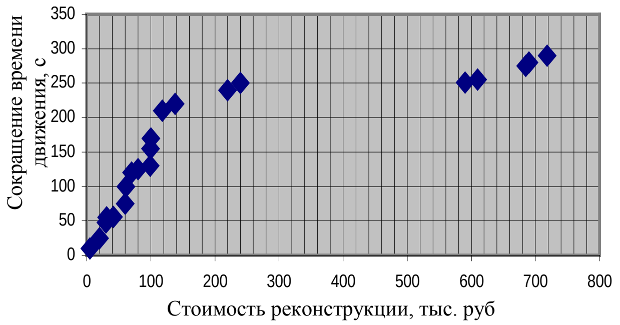

Рис. 1

В ряде случаев нет необходимости устанавливать на каждом объекте максимально допустимую скорость. Во-первых, реализация максимальной скорости на данном объекте может оказаться невозможной при наличии других ограничений; во-вторых, если предполагается поэтапная реконструкция объекта, т. е. ее стоимость является функцией скорости, то возникает задача определения оптимального уровня скорости для каждого объекта.

При таком подходе задача (7) усложняется. Нужно определить не только набор объектов, которые подлежат реконструкции, но и соответствующие уровни скорости в зависимости от стоимости реконструкции.

Задача решается с использованием симплекс-метода. Формируется m-мерное пространство, где m – количество объектов ω. Измерение i-е указывает на уровень скорости для i-го объекта, который может изменяться от $v_{\mathrm{min}i}$ и $v_{\mathrm{max}i}$. Таким образом, положение точки в пространстве определяет уровень скорости объектов множества Ω, и для этой точки можно определить значение функции $K(\Omega')$. Результатом решения являются набор объектов, которые подлежат реконструкции, и соответствующие уровни скорости, причем при такой реконструкции обеспечивается необходимое сокращение времени движения при минимальной скорости. Полученная при оптимизации рациональная скорость движения обеспечивает такое же сокращение времени при уменьшении затрат на 15–20 %.

ВЫВОДЫ

1. Несмотря на сложные условия работы, автомобильный транспорт Республики Беларусь может интегрироваться в европейскую транспортную сеть, проведя модернизацию (реконструкция и капитальный ремонт) дорог, искусственных сооружений и других устройств, которые входят в инфраструктуру автомобильной дороги.

2. На основе предложенного показателя «использование инвестиций» и модели его расчета обоснованы этапность и направления повышения скорости движения (снятие ограничения скорости) автомобилей при реконструкции дороги.

3. Разработанная математическая модель выбора стратегии оптимальной этапности реконструкции автомобильной дороги обеспечивает сокращение времени движения автомобиля при уменьшении на 15–20 % затрат относительно варианта, если максимальный уровень скорости не определяется, а задается.

4. Разработанная методика может быть использована не только для транспортных коридоров, но и на любом участке автомобильной дороги, где предусмотрена его реконструкция.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Программа** «Дороги Беларуси» на 2006–2015 годы. – Минск: Департамент «Белавтодор», 2006. – 48 с.

2. **Бережной, В. И.** Методы и модели управления материальными потоками микрологистической системы автопредприятия / В. И. Бережной, Е. В. Бережная. – Ставрополь: СТТУ Интеллект-сервис, 1996. – 155 с.

3. **Сильянов, В. В.** Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В. В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.

4. **Ивуть, Р. Б.** Логистика / Р. Б. Ивуть, С. А. Наружевич. – Минск: БНТУ, 2004. – 328 с.

Поступила 6.06.2006