

Оптимизация проектных решений по повышению экономической эффективности ремонтов и реконструкции автомобильных дорог

Optimization of design solutions to improve economic efficiency of repairs and reconstruction of roads

Царенкова Ирина Михайловна, кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры «Строительство и эксплуатация дорог»
Белорусского государственного университета транспорта

Tsarenkova Irina, PhD in Economic sciences, Associate Professor,
associate professor of the Department «Construction and maintenance of roads»
of Belarusian State University of Transport

e-mail: tsar_irina@mail.ru

Аннотация

Для обеспечения безопасности и бесперебойности движения автомобилей в условиях повышения пропускной и провозной способности автомобильных дорог производится их реконструкция. Разработаны методологические основы модернизации сети автомобильных дорог в условиях развития транспортно-логистической системы, базирующиеся на принципиально новом подходе к распределению капитальных вложений по длине дороги, обеспечивающем определение приоритетных участков с целью снятия существующих ограничений скорости и экономии времени движения грузов и пассажиров. Для уменьшения интервала неопределенности используется метод Фибоначчи. Для формирования оптимальной схемы автомобильных дорог, подлежащих капитальному ремонту, вводится понятие «показателя использования инвестиций». В результате расчетов устанавливается доминирующая последовательность участков, где необходимо в первую очередь провести ремонт для достижения максимального эффекта с учетом выделенных инвестиций. С целью отыскания оптимального решения при определении сроков и очередности проведения капитального ремонта и реконструкции автомобильной дороги учитывается многоэтапность капитальных вложений.

Ключевые слова: автомобильная дорога, капитальный ремонт, реконструкция, эффективность, дорожное хозяйство.

Abstract

The reconstruction of roads is carried out to ensure the safe and uninterrupted movement of vehicles in terms of increased throughput and capacity. The author develops the methodological basis for the modernization of the road network in the context of the development of transport-logistic system, based on an innovative approach to the allocation of capital investments according to the length of the road, which allows to determine priority areas for removal of existing speed limits and time-saving in the movement of goods and passengers. The Fibonacci method is used to reduce the interval of uncertainty. The concept of "increased investment" is introduced to develop an optimal scheme of road subject to overhaul. The result of the calculation defines the dominant sequence of sections, which should be repaired first to for maximum effect, taking into account the allocated investment. The multistage character of capital investments is taken into account in order to find the optimal solution for the scheduling and sequence of repairs and road reconstruction.

Keywords: motor road, overhaul, reconstruction, efficiency, road infrastructure.

Поступила в редакцию / Received: 21.09.2017

Web: <http://elibrary.miu.by/journals/item.eui/issue.2/article.2.html>

Введение

Проведение капитальных ремонтов и реконструкция автомобильных дорог является мощным средством увеличения скоростей движения автомобилей и повышения пропускной и провозной способности дорог. В составе стратегических направлений Государственной программы по развитию и содержанию автомобильных дорог в Республике Беларусь на 2015–2019 гг. большое внимание уделяется:

- модернизации республиканских автомобильных дорог с повышением их несущей способности до 11,5 т на одиночную ось на протяжении не менее 609,7 км;
- реконструкции по параметрам I категории грузонапряженных участков автомобильных дорог об-

щей протяженностью 274,2 км с доведением их до международных стандартов;

- увеличению скоростного режима на протяжении не менее 1637,6 км республиканских автомобильных дорог [1].

Из общего объема средств Государственной программы планируется направить на дорожные работы (содержание, текущий ремонт, капитальный ремонт, реконструкцию и возведение республиканских автомобильных дорог) 2713,2 млрд руб. в ценах января 2017 г., что составляет 65,0 % от общей потребности в финансовых средствах на улучшение транспортно-эксплуатационного состояния республиканских автомобильных дорог [1]. Планируемое распределение финансовых средств на дорожные работы представлено на рисунке 1.



Рисунок 1 – Распределение финансовых средств, предусмотренных на дорожные работы

Были проанализированы основные технические параметры дороги: план и продольный профиль, размеры перевозок, пропускная способность, техническое оснащение и др. В расчетах по повышению скорости движения автомобилей не учитывалось, что на одних участках достижение заданного уровня скорости связано с завышенными (неоправданными) инвестициями, а на других инвестиции не эффективны, т.е. в указанной постановке задача рационального распределения средств по длине дороги с целью достижения максимального эффекта (наибольшего сокращения времени движения автомобилей) вообще не ставилась.

В отдельных случаях 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, то есть ее стоимость является функцией скорости, то возникает задача определения оптимального уровня скорости для каждого объекта. При таком подходе задача 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 -ое указывает на уровень скорости для i -го объекта, который может изменяться от $v_{\min i}$ до $v_{\max i}$. 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 стоимости. Полученная при оптимизации рациональная скорость движения обеспечивает такое же сокращение времени при меньших на 15–20 % затратах.

Пользователем данной разработки будет макрологистическая система дорожного хозяйства. Ее реализация невозможна без формирования соответствующих логистических цепей и поддержки, которую мо-

жет оказать информационная логистическая система. Повышение скорости движения является неотъемлемым элементом оптимизации транспортных и финансовых логистических потоков.

В дальнейшей оптимизации используется метод наискорейшего спуска, заключающийся в определении показателя использования инвестиций

$$\mu_i = \frac{K_i(\omega_i)}{\Delta t_i(\omega_i)},$$

где K_i – капитальные вложения во мно-

жество элементов системы автомобильной дороги, подлежащих реконструкции; Δt_i – полученное при этом сокращение времени движения автомобиля. Определив μ на каждом участке, подлежащем реконструкции, составляем доминирующую последовательность показателей μ_i по мере их возрастания. $\sum \mu_i$ сравнивается с $\mu_i = \sum \frac{K_i}{\Delta t_i}$.

В результате применения изложенного алгоритма для решения задачи повышения скорости движения (снятия ограничений скорости) получена зависимость стоимости реконструкции от сокращения времени движения. По полученной зависимости определяется максимальное сокращение времени движения автомобилем при выделенных инвестициях, и наоборот, определяются необходимые капитальные вложения для обеспечения заданного сокращения времени движения. Поэтому в первую очередь реконструкцию следует производить на участках, расположенных в ранжированной последовательности $K/\Delta t$ от начала к концу, выделяя нужное K или Δt_i в зависимости от поставленной задачи.

Для определения необходимой последовательности производства экспериментов используются различные методы: метод дихотомии, метод Фибоначчи, «золотого сечения», поиск по дискретным точкам. С достаточной эффективностью применен метод Фибоначчи для выявления оптимума при решении ряда проектных задач [2]. Метод основан на производстве экспериментов для последовательного уменьшения интервала неопределенности в порядке, соответствующем числам Фибоначчи.

Числа Фибоначчи образованы так, что каждое последующее число (кроме нулевого и первого) равно

сумме двух предшествующих. Если обозначить число Фибоначчи F_k , где k соответствует порядковому номеру числа, то

$$F_0 = F_1 = 1; F_k = F_{k-1} + F_{k-2}; k=2, 3, 4, 5...$$

Для k от нуля до 8 эти числа приведены ниже:

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8
F_k	1	1	2	3	5	8	13	21	34

Применение этих чисел позволяет существенно сократить интервал неопределенности.

Дисконтированные строительно-эксплуатационные расходы (\mathcal{E}_{np}) используются как показатель сравнения вариантов, имеющих одинаковый объем оказанных услуг или реализованной продукции (в стоимостной форме):

$$\mathcal{E}_{np} = \sum_{T=0}^{T_p} K_t \eta_t + (1-\gamma) \sum_{T=0}^{T_p} C_t \eta_t, \quad (1)$$

где K_t – инвестиционные вложения в t -м году; C_t – текущие затраты по производству строительно-монтажных работ или эксплуатационные расходы в t -

году; γ – доля налоговых отчислений от прибыли; T_p – расчетный период (горизонт расчета), лет; t – номер шага расчета.

Рассмотрим случай, когда в процессе расчета возможен переход от убывания функции к ее возрастанию. Допустим, что при числе Фибоначчи F_8 установлено, что $\mathcal{E}_{13} > \mathcal{E}_{21}$, а при числе Фибоначчи $F_7 - \mathcal{E}_{21} < \mathcal{E}_{26}$. Учитывая, что искомая функция унимодальна, можно утверждать, что в этом случае ее оптимум находится в пределе от 13 до 26 км, т.е. в интервале неопределенности, соответствующем числу Фибоначчи F_6 . Тогда в этом интервале назначается дополнительный эксперимент в точке 5 нового интервала неопределенности, который соответствует 18 км. Если в этом случае $\mathcal{E}_{21} > \mathcal{E}_{18}$, а $\mathcal{E}_{18} < \mathcal{E}_{13}$, то искомый минимум находится в интервале от 13 до 21 км (точки 1–8), и интервал за пределами 21 км (точки 8–13) отпадает.

Наоборот, если $\mathcal{E}_{21} < \mathcal{E}_{18}$, а $\mathcal{E}_{18} < \mathcal{E}_{13}$, то искомый оптимум находится в интервале от 18 до 26 км (между точками 8–13) (рисунок 2). На рисунке 2 черные кружки – эксперименты в предшествующем интервале неопределенности, а окружности – в рассматриваемом интервале).

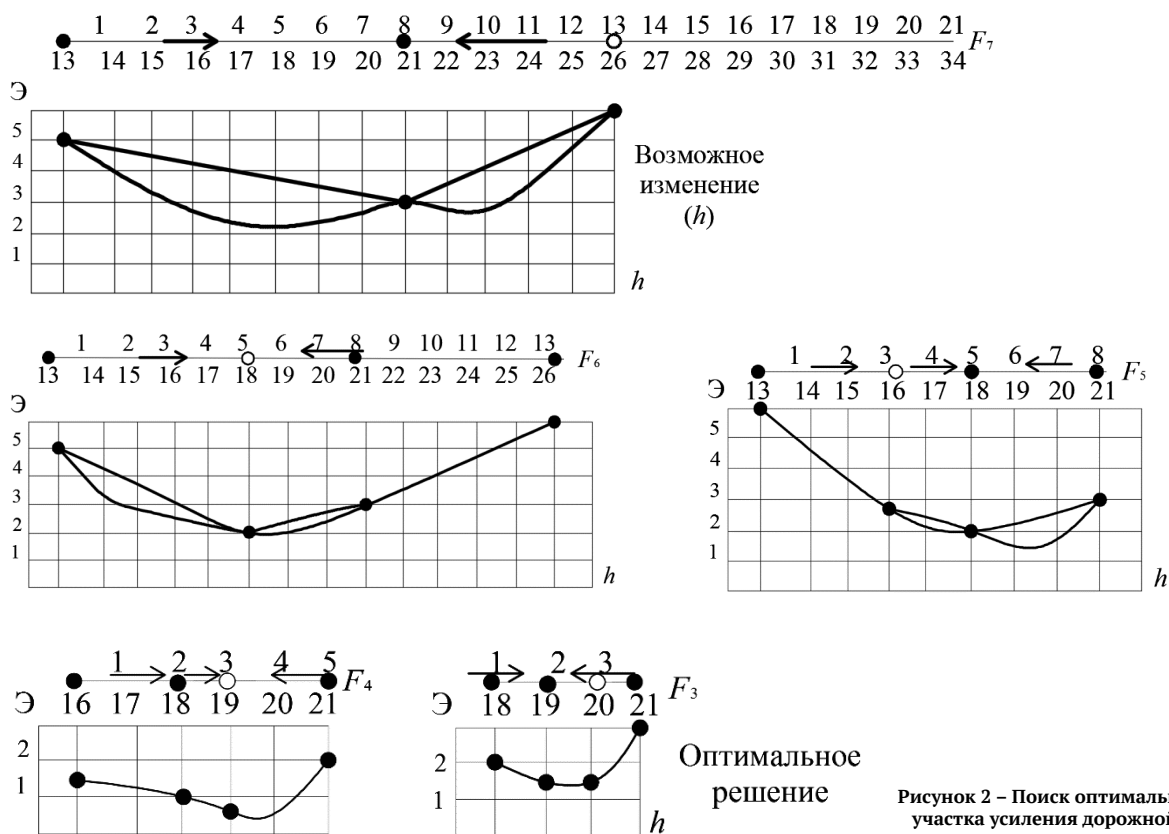


Рисунок 2 – Поиск оптимальной длины участка усиления дорожной одежды

В том и другом случае новый интервал неопределенности будет соответствовать числу Фибоначчи F_5 (рисунок 2). Продолжая дальнейший поиск в этом интервале (назначая новый дополнительный эксперимент), определяем последующее сокращение интервала неопределенности. Применение метода Фибоначчи требует всегда установления первоначального

интервала неопределенности, совпадающего с каким-либо числом Фибоначчи.

В условиях рыночных отношений дорожное хозяйство всегда ориентируется на запросы потребителей. Это требует постоянного совершенствования процесса планирования дорожно-строительных работ с целью снижения потерь.

Для получения оптимальной схемы проведения капитальных ремонтов на сети дорог используем метод динамического программирования, который специально приспособлен к «многоступовым» процессам, т.е. имеется возможность выбора параметров, причем на каждом шаге выбирается такое решение, от которого зависит оптимум на данном шаге и оптимум на процесс в целом. Это решение называется «шаговым управлением» (u). Совокупность шаговых управлений (U) есть совокупное решение по управлению процессом в целом $U = (u_1, u_2, \dots, u_y)$.

Найдем комплекс управлений u_y , при которых функция U обратится в экстремум, а так как в качестве

критерия оптимизации выступают суммарные затраты $S = \sum_{j=1}^y s_j \rightarrow \min$, то управление U^* , при кото-

ром этот минимум достигается, будет оптимальным управлением, состоящим из совокупности оптимальных шаговых управлений: $U^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_y^*)$. Оптимум, достигаемый при этом управлении, обозначим как $S^* = \min\{S(U^*)\}$.

При многоступовом процессе выбирается управление на каждом шаге с учетом расчетов на последующих шагах. Управление на j -м шаге выбирается так, чтобы была минимальная сумма затрат на всех оставшихся шагах с учетом данного.

Состояние (S) объекта управления учитывается на конец каждого периода i . S_0 – состояние объекта управления в начале первого шага. Тогда можно выбрать оптимальное управление u_1^* на первом шаге. Применив это управление, мы изменим состояние системы на некоторое новое S_1^* ; в этом состоянии подходим ко второму шагу. Тогда уже известно условное оптимальное управление u_2^* , которое к концу второго шага переводит объект управления в новое состояние S_2^* и т.д.

В результате по ходу оптимизации управления методом динамического программирования многоступовый процесс осуществляется дважды: первый – для определения условных оптимальных управлений: они проходят от начала процесса к его концу; второй раз – от конца к началу, когда определяется оптимальное решение U^* , состоящее из оптимальных шаговых управлений $u_1^*, u_2^*, \dots, u_y^*$. Тогда общий алгоритм построения и решения модели динамического программирования, с учетом специфики оптимизации, описанной выше, можно представить следующим образом.

Выбирается схема сети автомобильных дорог с участками, требующими капитального ремонта. Производится ранжирование состояний по мере убывания эксплуатационных расходов в порядке увеличения количества капитальных ремонтов с определением стоимости переходов между ними.

Критерием для выбора наилучшего варианта проектных решений является минимальная величина суммарных затрат, связанных с реализацией проекта S .

$$S = \sum_{i=1}^{m-1} K_{ij} \eta_i + \sum_{i=1}^m \sum_{t_n}^{t_k} 3_{it} \eta_t + \sum_{i=1}^{m-1} L_{ii} \eta_i, \quad \forall_i \in U^*, \quad (2)$$

где m – число состояний, принятых к рассмотрению; K_{ij} – капитальные вложения, необходимые для обес-

печения перехода из одного состояния (i) в другое (j); η_t – коэффициент дисконтирования затрат t -го шага к исходному (в качестве исходного принимается год эксплуатации дороги в существующем состоянии); t_n, t_k – начальный и конечный годы работы в каждом состоянии; 3_{it} – текущие затраты на t -м шаге расчета в i -м состоянии; L_{ii} – транзакционные издержки, связанные с реализацией решения по i -му варианту.

Формируется матрица стоимости капитальных ремонтов автомобильных дорог при возможных переходах из состояния i в состояние j . Намечается комплекс состояний, обеспечивающих на расчетную перспективу капитальные ремонты. Все принятые к анализу состояния наносятся на сетку «состояния – время» [3].

Дальнейший процесс формирования оптимальной схемы проведения капитальных ремонтов распадается на $m - 1$ шагов, где m – количество всех состояний, рассматриваемых в данном расчетном случае. Цель выполнения расчетов на каждом шаге в конечном счете сводится к выявлению целесообразности включения в схему последовательно всех рассматриваемых состояний, начиная с первого, затем второго, третьего и т.д.

Сопоставляя значения критериев и выявляя наименьшее значение, устанавливаем целесообразность включения в схему i -го состояния, т.е. в конечном итоге на каждом шаге расчет завершается выбором $\min S_{i,t_{ij}}$:

$$S_{j,t_{ij}} = \min \left\{ \frac{S_{j,t_{ij}} + \sum_{t_{i-1,i+1}}^{t_{i,j}} 3_{jt} \eta_t}{S_{i,t_{i+1,i}} + \sum_{t_{i-1,i+1}}^{t_{i,j}} 3_{jt} \eta_t + K_{ij} \eta_i + L_{ij} \eta_i} \right\}. \quad (3)$$

Оптимальная схема восстанавливается в обратном порядке по выбранным путям подхода, начиная с последнего шага расчета, по минимальным значениям промежуточных критериев на каждом предшествующем шаге.

По данной методике можно формировать схему ремонтов независимо от деления дорог на республиканские и местные, т.к. учитывается стоимость ремонта независимо от источника финансирования.

Представляют интерес исследования, направленные на рациональное использование ограниченных финансовых ресурсов при планировании дорожных работ. В этом плане решается задача совместного поиска оптимальных сроков проведения капитального ремонта и реконструкции автомобильной дороги, обеспечивающих снижение транспортно-эксплуатационных затрат пользователей и капитальных вложений в проведение дорожно-строительных работ.

Для отыскания оптимума при двух (как в данном случае) и более независимых переменных, т.е. при многомерном поиске, в настоящее время разрабатываются различные методы, которые основываются или на алгебраической, или на геометрической интерпретации решаемых задач.

Рассмотрим пример определения оптимального срока реконструкции автомобильной дороги t_1 в сочетании с определением оптимального срока ее капитального ремонта t_2 .

В первом случае зависимая переменная (критерий) с помощью алгебраических уравнений выражается в виде функции независимых переменных. При таком подходе отыскание оптимума сводится к анализу функции и решению системы уравнений.

При геометрической интерпретации и двух независимых переменных зависимая переменная (критерий) представляет собой точку в трехмерном пространстве. Совокупность всех точек зависимой переменной образует поверхность.

В качестве критерия оптимальности принимается минимальная величина суммарных затрат, связанных с реализацией стратегии (см. формулу 1). Следует обратить внимание на то, что она состоит фактически из

двух задач при $t_1 < t_2$, т.е. когда реконструкция автомобильной дороги производится в год t_1 , а затем осуществляется капитальный ремонт в год t_2 ; при $t_1 > t_2$, когда вначале производится капитальный ремонт, а затем реконструкция. Графические зависимости $t_1 < t_2$ и $t_1 > t_2$ приведены на рисунке 3, на прямой $t_1 = t_2$ функция имеет разрыв.

Подсчеты суммарных расходов для расчетных комбинаций t_1 и t_2 дают возможность построить пространственную модель – поверхность $S = f(t_1; t_2)$, на которую наносятся изолинии равных значений S через любой выбранный интервал изменения S , как это показано на рисунке 2.

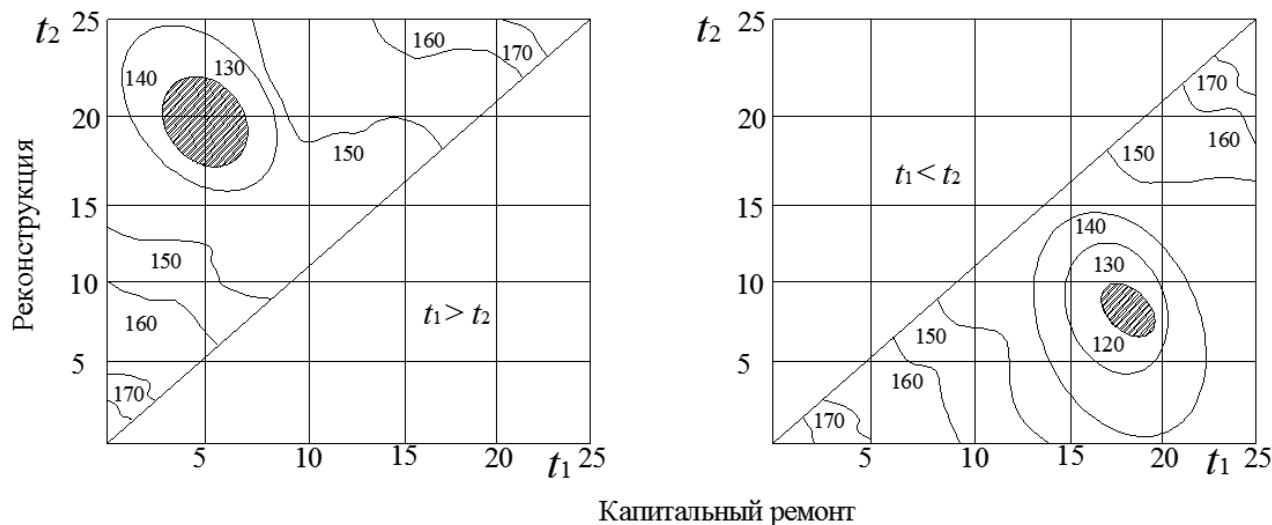


Рисунок 2 – Зависимость суммарных затрат $S = f(t_1; t_2)$

На рисунке 2 показаны два минимума. Первый минимум – абсолютный. При $t_1 = 5$ и $t_2 = 18$ лет, т.е. $t_1 < t_2$, что означает целесообразность сначала проведения капитального ремонта на данном участке автомобильной дороги, а затем, через 13 лет, его реконструкции. Второй минимум несколько больше абсолютной величины и соответствует другому сочетанию оптимальных сроков t_1 и t_2 : $t_1 = 17$ годам и $t_2 = 8$ годам, $t_1 > t_2$, т.е. целесообразно перевести участок дороги в более высокую категорию (сделать реконструкцию), а затем (через 9 лет) уже проводить его капитальный ремонт. В каждом конкретном случае такие материалы позволяют наиболее обоснованно выбрать оптимальное проектное решение.

Заключение

Разработанные методологические основы модернизации сети автомобильных дорог в условиях развития транспортно-логистической системы отражают особенности социально-ориентированной рыночной экономики, логистической направленности развития процессов в автомобильных перевозках грузов.

В отличие от существующих методик реконструкции автомобильных дорог (перевод автомобильной

дороги в более высокую категорию) участки реконструкции в итоге могут быть расположены по всей длине дороги, что позволит увеличить число реконструируемых участков при одинаковых капитальных вложениях.

Формирование оптимальной схемы автомобильных дорог, подлежащих капитальному ремонту, выполняется на основе подсчета «показателя использования инвестиций», который учитывает переустройство участка дороги за счет минимальных капитальных вложений при достижении максимального сокращения времени движения автомобиля. Отличие данной методики от существующих в том, что если располагать участки автомобильной дороги, подлежащие ремонту, по мере возрастания «показателя использования инвестиций», получается доминирующая последовательность участков, где необходимо в первую очередь провести ремонт для достижения максимального эффекта с учетом выделенных инвестиций.

Для отыскания оптимального решения при двух и более независимых переменных, т.е. при многомерном поиске, разработана методика определения сроков и очередности проведения капитального ремонта и реконструкции автомобильной дороги путем отыскания оптимума на поверхности откли-

ка при двух независимых переменных, позволяющая, в отличие от существующих, учесть многоэтапные инвестиции в автомобильную дорогу и выбрать рациональное сочетание их первоначального уровня и последующих текущих затрат пользователей автомобильной дороги.

Литература / References

- [1] Об утверждении Государственной программы по развитию и содержанию автомобильных дорог в Республике Беларусь на 2017–2020 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 18 сент. 2017 г., № 699 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: http://pravo.by/upload/docs/op/C21700699_1506373200. – Дата доступа: 26.09.2017.
- [2] Харчистов, Б.Ф. Методы оптимизации : учеб. пособие / Б.Ф. Харчистов. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2004. – 140 с.
- Kharchistov, B.F. *Metody optimizatsii: ucheb. posobiye* / B.F. Kharchistov. – Taganrog : Izd-vo TRTU, 2004. – 140 p.
- [3] Царенкова, И.М. Основы развития логистических систем в дорожном хозяйстве: монография / И.М. Царенкова. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 211 с.
- Tsarenkova, I.M. *Osnovy razvitiya logisticheskikh system v dorozhnom khozyaystve: monografiya* / I.M. Tsarenkova. – Gornel': BelGUT, 2017. – 211 p.