

УДК 330.15

DOI: 10.18384/2310-6646-2018-3-94-103

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО МАРШРУТА ГАЗОПРОВОДА С УЧЁТОМ СОЦИАЛЬНО-КУЛЬТУРНЫХ ФАКТОРОВ

Новоселов А.Л.¹, Новоселова И.Ю.¹, Желтенков А.В.²

¹Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова
115054, г. Москва, Стремянный пер., д. 36, Российская Федерация

²Московский государственный областной университет
141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24

Аннотация. В статье рассматривается проблема построения эффективного маршрута с учётом капитальных и эксплуатационных затрат, историко-культурной экспертизы и загрязнения окружающей среды. Предлагается формула оценки суммарных затрат на построение и эксплуатацию отдельных фрагментов газопровода, включающая компенсационные выплаты населению. При этом используется нечёткий метод оценки затрат, позволяющий представить ожидаемые суммарные затраты в виде треугольных чисел. Оптимальный вариант маршрута газопровода предложено определять с помощью метода Шимбола–Оттермана в нечёткой форме. Для выбора окончательного решения предложено воспользоваться риск-функцией оценки затрат. В статье представлены алгоритмы предлагаемых модификаций указанных методов и дан численный пример.

Ключевые слова: негативное влияние, окружающая среда, ущерб, компенсационные выплаты, алгоритм Шимбола–Оттермана, риск-функция, нечёткие числа, треугольные числа, оптимальный маршрут.

OPTIMAL DESIGN OF A GAS TRANSMISSION NETWORK REGARDING SOCIO-CULTURAL FACTORS

A. Novoselov¹, I. Novoselova¹, A. Zheltenkov²

¹Plekhanov Russian University of Economics
36, Stremyanny In., Moscow, 115054, Russian Federation

²Moscow Region State University
141014, Moscow region, Mytischy, ul. Vera Voloshina, house 24

Abstract. The article deals with the problem of designing an effective route taking into account capital and operating costs, historical and cultural expertise and environmental pollution. A formula is proposed for estimating the total costs for the construction and operation of gas pipeline sections including compensation payments to the population. At the same time, a fuzzy cost estimating method is used, which allows to present the expected total costs in the form of triangular numbers. It is proposed to calculate the optimal variant of a gas transmission network by using the Schimbel–Otterman method in a fuzzy form. To choose the final solution, it is suggested to use a risk-function of cost estimation. The algorithms of the proposed modifications of these methods are presented and a numerical example is given.

Key words: negative impact, environment, damage, compensation payments, Schimbel–Otterman algorithm, risk-function, fuzzy numbers, triangular numbers, optimal route.

Постановка проблемы

Россия обладает четвертью общемировых разведанных запасов природного газа и крупнейшей газотранспортной системой – её протяжённость составляет 168,3 тыс. км. Добываемый в России природный газ поступает в магистральные газопроводы, объединённые в Единую систему газоснабжения России (ЕСГ). Сеть газопроводов растёт в связи с расширением эксплуатируемых месторождений, расширением рынков сбыта природного газа. При прокладке маршрута нового газопровода учитываются геофизические факторы, протяжённость, влияние на экологическое состояние территории [1], памятники истории и культуры, а также влияние на среду обитания населения региона. Два последних аспекта представляют важные факторы, которые следует учитывать при разработке маршрута газопроводов, но строгих математических методов решения данной задачи до сих пор не было разработано.

В основе такой оценки лежит историко-культурная экспертиза, проводимая этнологами, археологами и архитекторами в местах предполагаемых транспортных коридоров [2]. Решения по выбору оптимального маршрута газопровода в местах проживания и ведения хозяйственной деятельности населения должны приниматься с учётом результатов этнологических экспертиз и минимизации вмешательства в исконную среду обитания, традиционное природопользование и образ жизни. Необходимы информирование местного населения и привлечение его представителей к процессу консультаций [3]. При выборе маршрута газопровода должна учитываться необходимость минимизации рисков негативного влияния на традиционную экономику и культурную жизнь населения. Возможности развития туризма также могут быть сокращены в результате прокладки газопровода. Совокупность приведённых выше факторов должна быть учтена при разработке оптимального маршрута газопровода наряду с капитальными затратами на его строительство и текущими затратами на его эксплуатацию.

Разработанная модель и алгоритм решения задачи

В основе выбора оптимального маршрута газопровода лежит ориентированный граф G , в котором отсутствуют обратные дуги. Каждая дуга (i, j) соответствует фрагменту газопровода, после которого начинается очередная альтернатива. Поскольку любому фрагменту газопровода (i, j) соответствуют затраты на строительство, эксплуатацию, компенсационные выплаты населению и вероятностную оценку штрафов и экстренных выплат населению в случае аварий, эти затраты следует рассматривать в динамике за период, охватывающий строительство и эксплуатацию газопровода. Для этого суммарные затраты следует просуммировать с учётом фактора времени, т. е. с использованием дисконтного множителя. Поскольку суммарные затраты относятся к фрагменту маршрута газопровода (i, j) , то их обозначим $V_{(i, j)}$. Значения каждого из составляющих суммарных затрат, относящихся к компенсационным выплатам населению и оцен-

ке ущерба окружающей среды, определяются экспертным методом. Поэтому в результате экспертной оценки находятся минимальное (\min), ожидаемое (av) и максимальное (\max) значение оцениваемого показателя. Тогда в год t величины оценки штрафов и экстренных выплат населению в случае аварий техногенного или природного характера – $\hat{R}_{t(ij)} = (R_{t(ij)}^{\min}, R_{t(ij)}^{av}, R_{t(ij)}^{\max})$, а компенсационные выплаты населению, связанные со строительством и эксплуатацией газопровода, – $\hat{K}_{t(ij)} = (K_{t(ij)}^{\min}, K_{t(ij)}^{av}, K_{t(ij)}^{\max})$. Такое представление этих показателей соответствует нечётким (треугольным) числам A , которые задаются тремя значениями, которым соответствует оценка уверенности или функция принадлежности $\mu(A)$, причём $\mu(A^{\min}) = 0$; $\mu(A^{av}) = 1$; $\mu(A^{\max}) = 0$. Нечёткие числа удобно отображать графически, например, для треугольного числа $A=(5; 8; 9)$ получаем графическое отображение, представленное на рис. 1.

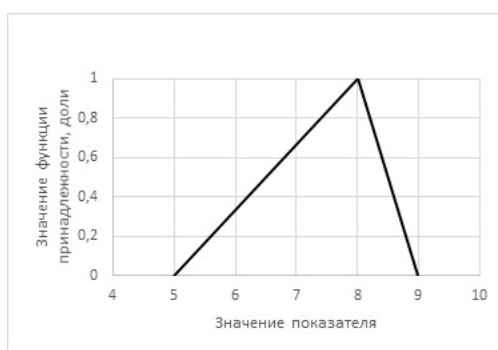


Рис. 1. Графическое отображение треугольного числа

Арифметические операции с нечёткими числами представлены, например, в [4]. Суммарные затраты для дуги (ij) определяются по формуле как треугольное число:

$$\hat{V}_{(ij)} = \sum_{t=T_1}^{T_2} (S_{t(ij)} + \hat{R}_{t(ij)}) (1+r)^{1-t} + \sum_{t=1}^{T_0} Z_{t(ij)} (1+r)^{1-t} + \sum_{t=1}^{T_1} \hat{K}_{t(ij)} (1+r)^{1-t} \quad (1)$$

где $S_{t(ij)}$ – эксплуатационные затраты на фрагменте газопровода (ij) $\in G$ в год t ;
 $R_{t(ij)}$ – нечёткая оценка штрафов и экстренных выплат населению в случае аварий техногенного или природного характера при эксплуатации фрагмента газопровода (ij) $\in G$ в год t ;

$Z_{t(ij)}$ – капитальные затраты на строительство фрагмента газопровода (ij) $\in G$ в год t ;

$\hat{K}_{t(ij)}$ – нечёткая оценка компенсационных выплат, связанных со строительством и эксплуатацией фрагмента газопровода (ij), $\in G$ в год t ;

t – текущий год;

$(1, 2, \dots, T_0)$ – период строительства фрагмента газопровода (ij);

$(T_0 + 1, \dots, T_1)$ – период эксплуатации фрагмента газопровода (ij).

Для поиска варианта строительства газопровода $L = \{1, \dots, n\}$, соединяющего месторождение (начальное событие графа альтернатив строительства газопровода, равное единице) с конечным пунктом – магистральным газопроводом или терминалом отгрузки природного газа (конечное событие графа альтернатив строительства газопровода, равное n), с минимальными суммарными затратами, следует воспользоваться одним из следующих методов:

- методом Флойда–Уоршелла [5];
- методом Беллмана–Форда [6];
- методом Дейкстры [5];
- методом Джонсона [7];
- алгоритмом Левита [8];
- методом Шимбела [9];
- методом Оттермана [10].

Проведённый анализ методов поиска кратчайшего расстояния в орграфе позволяет утверждать, что наиболее целесообразным является использование комбинированного метода Шимбела–Оттермана. Особенность матричных операций в методе Шимбела заключается в реализации операции суммирования элементов a и b ($c = a \oplus b$), которые в общем виде представлены ниже:

$$c = \begin{cases} 0, & \text{если } a > 0 \wedge b = 0 \\ 0, & \text{если } b > 0 \wedge a = 0 \\ 0, & \text{если } a = 0 \wedge b = 0 \\ a + b, & \text{если } a > 0 \wedge b > 0 \end{cases} \quad (2)$$

где a и b – числа больше нуля.

С учётом того, что в поставленной задаче необходим поиск маршрута $L = \{1, \dots, n\}$ в условиях нечётко заданных суммарных затрат для каждого фрагмента маршрута, в данный алгоритм внесён ряд корректировок.

В предлагаемом алгоритме проводится поиск оптимального варианта маршрута газопровода для разных уровней функции принадлежности – от нуля до единицы отдельно для левой и правой границ треугольного числа. Ниже приводится расчёт для заданных значений функции принадлежности μ^* и варианта границы треугольных чисел (левой или правой), характеризующих суммарные затраты $V_{(ij)}^{\mu^*}$ для отдельных фрагментов маршрута газопровода $(ij) \in G$.

Шаг 1. Расчёт проводится для определённых суммарных затрат при заданных значениях функции принадлежности μ^* и границы треугольных чисел (\min , \max), задающих суммарные затраты для фрагментов маршрута газопровода $V_{(ij)}^{\mu^*}$.

Шаг 2. Формирование матрицы смежности A , в которой при наличии дуги указываются суммарные затраты $V_{(ij)}^{\mu^*}$, которые должны быть предварительно найдены по формуле (1):

$$A_{ij} = \begin{cases} V_{(ij)}^{\mu^*}, & \forall (ij) \in G \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3)$$

Шаг 3. Присвоение $B = A; p=1$

Шаг 4. Расчёт матрицы C^p суммы весов между вершинами для всех путей, состоящих из двух дуг в соответствии с правилами (2). Элементы матрицы C определяются по формуле:

$$C_{ij}^p = \begin{cases} \min_{k=1,2,\dots,n} \{a_{kj} \oplus b_{ik} \mid a_{kj} \oplus b_{ik} > 0\}, & \text{если } \exists a_{kj} \oplus b_{ik} > 0 \\ 0, & \text{если все } a_{kj} \oplus b_{ik} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Шаг 5. Формирование матрицы трассировки T^p , показывающей предшествующую вершину для каждой достигаемой вершины, представленной в столбцах этой матрицы по правилу:

$$T_{ij}^p = \begin{cases} k^* \text{ исходя из } \lambda_{ijk}^* = \min_{k=1,2,\dots,n} \{a_{kj} \oplus b_{ik} \mid a_{kj} \oplus b_{ik} > 0\}, & \text{если } \exists a_{kj} \oplus b_{ik} > 0 \\ 0, & \text{если все } a_{kj} \oplus b_{ik} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Шаг 6. Проверка: есть ли в матрице C^p ненулевые элементы? Если есть, то переход к шагу 6; в противном случае – к шагу 7.

Шаг 7. Присвоение $B = A; p = p+1$; переход к шагу 3.

Шаг 8. Определение минимального веса для лучшего варианта строительства газопровода:

$$F_p^* = \min_{l=1,2,\dots,p} \{C_{1n}^l\} \quad (6)$$

Шаг 9. Формирование оптимального маршрута $L^* = \{1, \dots, n\}$ на основе первых строк матриц трассировки $C^l, l = 1, 2, \dots, p^*$. Конец расчёта для заданной функции принадлежности и указанной границы треугольного числа, характеризующего суммарные затраты на реализацию газопровода в разрезе его фрагментов.

Приведённый алгоритм повторяется для значений α , соответственно, левой и правой границ оценки суммарных затрат для фрагментов маршрута газопровода. В результате определяются оптимальные по критерию минимизации суммарных затрат на строительство и эксплуатацию газопровода с учётом компенсационных выплат населению (1) варианты маршрутов.

На основе полученных оптимальных значений суммарных затрат следует построить риск-функцию. В соответствии с постановкой задачи, были скорректированы формулы построения риск-функции суммарных затрат и построен алгоритм, состоящий из следующих трёх шагов:

Шаг 1. Расчёт промежуточного значения α при варьировании G от Z_{\min}^{Σ} до Z_{\max}^{Σ} с априорно заданным интервалом Δ ($G = Z_{\max}^{\Sigma}, Z_{\max}^{\Sigma} - \Delta, Z_{\max}^{\Sigma} - 2\Delta, \dots, Z_{\min}^{\Sigma}$):

$$\alpha = \begin{cases} \frac{Z_{\max}^{\Sigma} - G}{Z_{\max}^{\Sigma} - Z_{av}^{\Sigma}}, & Z_{av}^{\Sigma} \leq G \leq Z_{\max}^{\Sigma} \\ \frac{G - Z_{\min}^{\Sigma}}{Z_{av}^{\Sigma} - Z_{\min}^{\Sigma}}, & Z_{\min}^{\Sigma} \leq G < Z_{av}^{\Sigma} \end{cases} \quad (7).$$

Шаг 2. Расчёт промежуточного значения R при варьировании G от Z_{\min}^{Σ} до Z_{\max}^{Σ} с априорно заданным интервалом Δ :

$$R = \frac{Z_{\max}^{\Sigma} - G}{Z_{\max}^{\Sigma} - Z_{\min}^{\Sigma}}, \quad Z_{\min}^{\Sigma} \leq G < Z_{\max}^{\Sigma} \quad (8).$$

Шаг 3. Расчёт значений риск-функции $Risk(G)$ при варьировании G от Z_{\min}^{Σ} до Z_{\max}^{Σ} с априорно заданным интервалом Δ :

$$Risk(G) = \begin{cases} R \left(1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \ln(1-\alpha) \right), & Z_{\max}^{\Sigma} \leq G < Z_{av}^{\Sigma} \\ 1 - (1-R) \left(1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \ln(1-\alpha) \right), & Z_{av}^{\Sigma} \leq G < Z_{\min}^{\Sigma} \\ 1, & G = Z_{\min}^{\Sigma} \end{cases} \quad (9).$$

Каждому участку риск-функции соответствует оптимальный вариант газопровода, минимизирующий суммарные затраты, что позволяет выбрать маршрут при требуемом верхнем пределе риска.

Численный пример

На рис. 2 представлены маршруты газопровода от месторождения (вершина 1) до терминала отгрузки (вершина 6). На дугах представленного ориентированного графа указаны нечёткие оценки суммарных затрат.

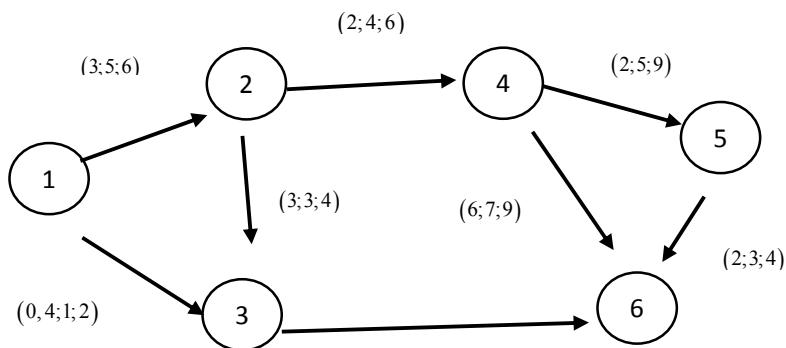


Рис. 2. Ориентированный граф, представляющий совокупность маршрутов, составленных из отдельных фрагментов $(ij) \in G$ с нечёткими оценками суммарных затрат

В результате скорректированного авторами статьи алгоритма Шимбела–Оттермана были получены результаты для границ нечётких оценок суммарных затрат (табл. 1). На рис. 3 представлено графическое отображение треугольного значения минимальных суммарных затрат для найденных маршрутов газопровода.

Таблица 1

Варианты оптимального маршрута газопровода для нечётких оценок суммарных затрат

Вариант расчёта	Минимальные суммарные затраты	Выбранный маршрут
Левая граница нечёткой оценки затрат при значении функции принадлежности $\mu = 0$	9,4	$L = \{1-2-4-5-6\}$
Среднее значение нечёткой оценки затрат при значении функции принадлежности $\mu = 1$	16,0	$L = \{1-2-4-6\}$
Правая граница нечёткой оценки затрат при значении функции принадлежности $\mu = 0$	21,0	$L = \{1-2-4-6\}$

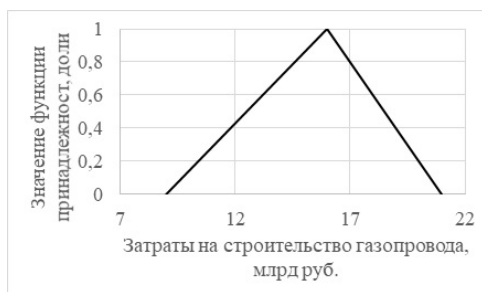


Рис. 3. Графическое представление нечётких оптимальных суммарных затрат при выборе оптимального маршрута газопровода

Для детализации полученного решения рассчитывается риск-функция затрат (рис. 4).

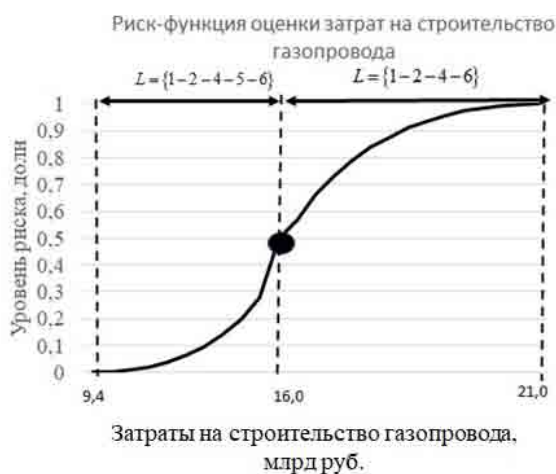


Рис. 4. График риск-функции затрат на реализацию газопровода

На графике выделена точка, соответствующая среднему значению нечёткого треугольного числа. Слева от этой точки оптимальным является маршрут $L = \{1-2-4-5-6\}$, а справа – $L = \{1-2-4-6\}$. Полученный график риск-функции следует использовать для определения оптимального варианта маршрута прокладки при заданном уровне риска. Например, при уровне риска 0,2 (20%) оптимальный маршрут газопровода $L = \{1-2-4-5-6\}$.

Заключение

Предложенные алгоритмы были реализованы в виде программного комплекса в среде *MS-Excel* с использованием авторских макросов, написанных на языке VBA. Программный комплекс позволяет выявить все маршруты для найденного нечёткого значения минимальных суммарных затрат на строительство и эксплуатацию газопровода и провести визуализацию всех этапов поиска решения поставленной задачи. Апробация разработанных алгоритмов с использованием данного программного комплекса доказывает его высокую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1296 с.
2. Левит Б.Ю. Алгоритмы поиска кратчайших путей на графе. Труды института гидродинамики СО АН СССР // Моделирование процессов управления. 1971. Вып. 4. С. 117–148.
3. Левитин А.В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. М.: Вильямс, 2006. 576 с.
4. Новоселов А.Л., Медведева О.Е., Новоселова И.Ю. Экономика, организация и управление в области недропользования: учеб. и практикум. М.: Юрайт, 2014. 625 с.
5. Порфирьев Б.Н., Тулупов А.С. Оценка экологической опасности и прогноз экономического ущерба от аварийных ситуаций на промышленных предприятиях // Проблемы прогнозирования. 2017. № 6. С. 37–46.
6. Bellman R. On a Routing Problem // Quarterly of Applied Mathematics. 1958. Vol. 16. No. 1. P. 87–90.
7. Krupnik I., Mason R. Northern Ethnographic Landscapes // Perspectives from Circumpolar Nations / ed. T. Horton. Washington, 2004. P. 1–13.
8. Murashko O.A. What is the Etnologicheskaja Ekspertiza in Russia? // Special issue of Sibirica: the Interdisciplinary Journal of Siberian Studies. 2006. Vol. 5. No. 2. P. 77–94.
9. Otterman J. Matrix Multiplication in Search for Alternate Routes // Electronica Com. IT. 1963. Vol. 38. No. 2. P. 156–164.
10. Shimbel A. Structural Parameters of Communication networks // Bulletin of Mathematical Biophysics. 1953. Vol. 15. No. 4. P. 501–507.

REFERENCES

1. Cormen T.H., Leiserson Ch.E., Rivest R.L., Stein C. *Algoritmy: postroenie i analiz* [Introduction to Algorithms]. Moscow, Williams Publ., 2006. 1296 p.
2. Levit B.Yu. [Algorithms for Finding the Shortest Paths in a Graph. Proceedings of the Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR]. In: *Modelirovanie protsessov upravleniya* [Modeling of Management Processes], 1971, no. 4, pp. 117–148.

3. Levitin A.V. *Algoritmy: vvedenie v razrabotku i analiz* [Algorithms: Introduction to Design and Analysis]. Moscow, Williams Publ., 2006. 576 p.
4. Novoselov A.L., Medvedeva O.E., Novoselova I.Yu. *Ekonomika, organizatsiya i upravlenie v oblasti nedropol'zovaniya* [Economics, Organization and Management in the Field of Mineral Resources]. Moscow, Yurait Publ., 2014. 625 p.
5. Porfir'ev B.N., Tulupov A.S. [Environmental Risk Assessment and Forecast of Economic Damage in Emergency Cases at Industrial Enterprises]. In: *Problemy prognozirovaniya* [The Problems of Forecasting], 2017, no. 6, pp. 37–46.
6. Bellman R. On a Routing Problem. In: *Quarterly of Applied Mathematics*, 1958, vol. 16, no. 1, pp. 87–90.
7. Krupnik I., Mason R., Northern Ethnographic Landscapes. In: Horton T., ed. *Perspectives from Circumpolar Nations*. Washington, 2004, pp. 1–13.
8. Murashko O.A. What is the Ethnological Expertise in Russia? In: *Special issue of Sibirica: the Interdisciplinary Journal of Siberian Studies*, 2006, vol. 5, no. 2, pp. 77–94.
9. Otterman J. Matrix Multiplication in Search for Alternate Routes. In: *Electronica Com. IT*, 1963, vol. 38, no. 2, pp. 156–164.
10. Shimbel A. Structural Parameters of Communication Networks. In: *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 1953, vol. 15, no. 4, pp. 501–507.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект «Разработка экономического механизма согласования интересов государства и бизнеса для реализации региональных природоохранных проектов и программ» № 17-02-00010- ОГН

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, the project “Development of an economic mechanism for coordinating the interests of the state and business for the implementation of regional environmental projects and programs” No. 17-02-00010-OGN

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новоселов Андрей Леонидович – доктор экономических наук, профессор кафедры математических методов в экономике Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова;
e-mail: alnov2004@yandex.ru

Новоселова Ирина Юрьевна – доктор экономических наук, профессор кафедры математических методов в экономике Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова;
e-mail: iunov2010@yandex.ru

Желтенков Александр Владимирович – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой менеджмента и государственного управления Московского государственного областного университета;
e-mail: kaf-menedg@mgou.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Andrey L. Novoselov – Doctor of Economics, professor at the Department of Mathematical Methods in Economics, Plekhanov Russian University of Economics;
e-mail: alnov2004@yandex.ru

Irina Yu. Novoselova – Doctor of Economics, professor at the Department of Mathematical Methods in Economics, Plekhanov Russian University of Economics;
e-mail: iunov2010@yandex.ru

Alexander V. Zheltenkov – Doctor of Economics, professor, head of the Department of Management and Public Administration, Moscow Region State University;
e-mail: kaf-menedg@mgou.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Новоселов А.Л., Новоселова И.Ю., Желтенков А.В. Разработка эффективного маршрута газопровода с учётом социально-культурных факторов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика. 2018. № 3. С. 94–103.

DOI: 10.18384/2310-6646-2018-3-94-103

FOR CITATION

Novoselov A.L., Novoselova I.Y., Zheltenkov A.V. Optimal Design of a Gas Transmission Network Regarding Socio-Cultural Factors In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Economics*, 2018, no. 3, pp. 94–103.

DOI: 10.18384/2310-6646-2018-3-94-103