

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-449-454>

УДК 625

Технико-экономическое сравнение конструкций дорожных одежд с использованием местных материалов

Докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾,
аспиранты А. В. Савуха¹⁾, В. В. Гиринский¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Рассмотрена возможность применения местных материалов при устройстве конструктивных слоев дорожной одежды. Приведен метод технико-экономического анализа, для которого необходимо знать расчетные модули деформации сравниваемых материалов. Зная межремонтные сроки для каждого из рассматриваемых вариантов, можно, сопоставляя их со сроками окупаемости, более полно выявить технико-экономические особенности таких вариантов. Основным критерием допустимости применения местного материала в соответствующем конструктивном слое является равнопрочность конструкций дорожных одежд или отдельных конструктивных слоев, устраиваемых из местных и привозных материалов. Критерий экономической целесообразности использования местного материала может быть записан в виде неравенства. Применяя принцип эквивалентности систем, можно заменять отдельные конструктивные слои дорожной одежды, устраиваемые из определенных материалов, эквивалентными по жесткости слоями из других материалов, увеличивая или уменьшая их толщину в зависимости от прочностных характеристик самих материалов. Исходя из условия равнопрочности конструкций из местных и привозных материалов, определено основное условие технической целесообразности использования местного материала. Построен график предварительного определения технико-экономической целесообразности применения местных материалов в конструктивных слоях дорожных одежд. В качестве дополнительного критерия экономической выгоды сравниваемых вариантов может быть использована суммарная величина вкладываемых затрат.

Ключевые слова: местные материалы, технико-экономический анализ, дорожная одежда, модуль деформации, эквивалентный слой, равнопрочность конструкций

Для цитирования: Ковалев, Я. Н. Технико-экономическое сравнение конструкций дорожных одежд с использованием местных материалов / Я. Н. Ковалев, А. В. Савуха, В. В. Гиринский // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 449–454. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-449-454>

Feasibility Study Comparison of Pavement Designs Using Local Materials

Ya. N. Kovalev¹⁾, A. V. Savukha¹⁾, V. V. Girinsky¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The possibility of using local materials in the construction of structural layers of pavement is considered in the paper. The paper presents a method of technical and economic analysis, for which it is necessary to know the calculated deformation moduli of the materials being compared. Knowing the turnaround time for each of the options under consideration,

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

it is possible, by comparing them with the payback periods, to more fully identify the technical and economic features of such options. The main criterion for the admissibility of the use of local material in the corresponding structural layer is the equal strength of pavement structures or individual structural layers made of local and imported materials. The criterion of economic feasibility of using local material can be written as an inequality. Using the principle of equivalence of systems, it is possible to replace individual structural layers of pavement, made of certain materials, with equivalent layers of stiffness from other materials, increasing or decreasing their thickness, depending on the strength characteristics of the materials themselves. The main condition for the technical feasibility of using local material has been determined on the basis of the condition of equal strength structures made from local and imported materials. A schedule for preliminary determination of the technical and economic feasibility of using local materials in the structural layers of road pavements has been built. The total value of the investment costs can be used as an additional criterion for the economic benefits of the compared options.

Keywords: local materials, technical and economic analysis, pavement, deformation modulus, equivalent layer, equal strength structures

For citation: Kovalev Ya. N., Savukha A. V., Girinsky V. V. (2021) Feasibility Study Comparison of Pavement Designs Using Local Materials. *Science and Technique*. 20 (5), 449–454. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-449-454> (in Russian)

Введение

Продукцией автомобильного транспорта является объем транспортной работы, а ее стоимость определяется себестоимостью перевозок грузов и пассажиров, являющейся важнейшим экономическим измерителем работы автомобильного транспорта. Следовательно, определение экономического эффекта от капиталовложений в дорожное строительство должно основываться, прежде всего, на уменьшении стоимости автоперевозок грузов и пассажиров на участках проектируемых дорог. В настоящее время имеется ряд достаточно подробно разработанных методических предложений по технико-экономическому анализу. Затраты на постройку и последующую эксплуатацию дорог, включая средства, необходимые для выполнения среднего и капитального ремонта, во всех существующих методах технико-экономического анализа предлагается учитывать в комплексе с транспортными расходами.

Технико-экономический анализ

К числу наиболее универсальных методов технико-экономического анализа относится метод СоюздорНИИ, разработанный Н. Ф. Хорошиловым [1], исходным положением которого является учет эффективности средств, вкладываемых в дорожное строительство, с помощью вводимого в расчеты коэффициента общественной эффективности развития народного хозяйства. Для выбора более выгодного варианта расчета по этому методу необходимо произвести подсчет приведенных затрат на рассматриваемый год по формуле

$$B = CK_n + (D_1 + T_1 + X_1)K_{n-1} + (D_2 + T_2 + X_2)K_{n-2} + \dots + (D_{n-1} + T_{n-1} + X_{n-1})K_1 + (D_n + T_n + X_n) + \sum_1^n a, \quad (1)$$

где B – сумма общих, приведенных к n -му году, затрат по данному варианту; C – строительные затраты; K_n – коэффициент общественной эффективности капитальных вложений за n лет [1]; D – ежегодные дорожно-эксплуатационные расходы; T – транспортные расходы; X – прочие ежегодные расходы; n – рассматриваемый год сравнения; a – ежегодные отчисления на ремонт и переустройство данного варианта.

В тех случаях, когда ежегодные расходы за рассматриваемый период мало изменяются или остаются постоянными, формула подсчета приведенных затрат записывается в более простом виде

$$B = CK_n + (D + T + X) \sum_1^{n-1} K_n + \sum_1^n a. \quad (2)$$

Год, в котором приведенные затраты для двух сравниваемых вариантов становятся одинаковыми, является годом экономической равнозначности этих вариантов. Для определения дорожно-эксплуатационных, транспортных и других расходов Н. Ф. Хорошиловым разработана соответствующая методика с таблицами и графиками, позволяющими быстро и точно вычислять указанные расчетные величины [1, 2].

При определении суммарной величины транспортных расходов следует учесть, что

нарастание грузооборота на вновь строящихся дорогах, как показали исследования последних лет, подчиняется закону геометрической прогрессии. Поэтому суммарную экономию транспортных расходов за весь период срока окупаемости t_0 целесообразно определять по формуле [3]

$$\mathcal{E}_T = \frac{B_0(qt_0 - 1)}{q - 1}(z_0 - z_1), \quad (3)$$

где \mathcal{E}_T – суммарная экономия, или снижение дорожно-транспортных расходов за период окупаемости; B_0 – первоначальная грузонапряженность движения по дороге; q – знаменатель геометрической прогрессии роста первоначальной грузонапряженности движения; t_0 – срок окупаемости; z_0 – себестоимость перевозок (транспортные расходы) на дороге до постройки данного варианта дорожной одежды; z_1 – то же на дороге с рассматриваемым вариантом дорожной одежды.

В качестве обобщенного показателя степени технико-экономической эффективности в соответствии с «Типовой методикой определения экономической эффективности, капитальных вложений» следует использовать срок окупаемости первоначальных затрат при строительстве с учетом последующих дорожно-эксплуатационных расходов и средств, необходимых для выполнения первого капитального ремонта, за счет экономии на транспортных расходах, образующейся при принятии более совершенного в техническом отношении варианта дорожной одежды [4]. Приняв годовые дорожно-эксплуатационные расходы за расчетный период в пределах срока окупаемости (но не далее срока службы варианта) постоянными, с учетом сказанного формулу для определения полных дорожно-транспортных затрат, приведенных к расчетному году (году экономической окупаемости t_0), можно записать в виде

$$B = CK_{t_0} + \left[dt_0 + \frac{B_0(qt_0 - 1)}{q - 1}(z_0 - z_1) + Xt_0 \right] K_{cp} + \sum_1 a, \quad (4)$$

где K_{t_0} – коэффициент общественной эффективности вложения средств за t_0 лет; K_{cp} – сред-

невзвешенное значение этого коэффициента за тот же период.

Согласно «Типовой методике», при расчетах экономической эффективности сравниваемых вариантов необходимо сопоставлять фактические сроки окупаемости t_0 с нормативными значениями этих сроков T_0 , которые для транспортных отраслей народного хозяйства установлены в пределах до 10 лет.

Составим уравнение окупаемости основных приведенных к нормативному году затрат за счет экономии на транспортных расходах

$$CK_{\text{норм}} + (DK_{cp} + XK_{cp} + a)T_0 = \frac{B_0(qt_0 - 1)}{q - 1}(z_0 - z_1). \quad (5)$$

Решая уравнение (5) относительно t_0 , получим следующее выражение:

$$t_0 = \frac{1}{\lg q} \times \left\{ 1 + \frac{[CK_{\text{норм}} + (DK_{cp} + XK_{cp} + a)T_0](q - 1)}{B_0(z_0 - z_1)} \right\}. \quad (6)$$

В соответствии с «Типовой методикой» примем:

за коэффициент фактической сравнительной экономической эффективности отношение

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{t}; \quad (7)$$

за отраслевой коэффициент сравнительной экономической эффективности

$$E = \frac{1}{T_0}. \quad (8)$$

Тогда очевидно, что вариант с меньшим сроком окупаемости (разумеется, в пределах нормативного срока) или, что то же самое, с большим значением коэффициента фактической сравнительной экономической эффективности будет более выгодным [5]. Зная межремонтные сроки (определяя их по формулам или таблицам) для каждого из рассматриваемых вариантов, можно, сопоставляя их со сроками окупаемости тех же вариантов, достаточно полно выявить технико-экономические особен-

ности сравниваемых вариантов. Более экономически выгодным будет тот вариант, для которого фактический срок окупаемости меньше соответствующего данному варианту межремонтного срока.

Анализ зависимости $B/t = f(t)$ показывает, что до определенного года значение B/t уменьшается, а затем, с дальнейшим увеличением срока, повышается. Поэтому в качестве дополнительного критерия экономической выгоды сравниваемых вариантов может быть использована суммарная величина вкладываемых затрат B_S , подсчитываемая по формулам:

$$B_{ST_0} = S_t + T_0 C_{тр}; \quad (9)$$

$$B_{SE} = S_{тр} + EK_1, \quad (10)$$

где S_t – капитальные вложения по каждому варианту, приведенные к нормативному сроку окупаемости; $C_{тр}$ – годовая себестоимость транспортных расходов по каждому варианту [6].

В свою очередь:

$$\left. \begin{aligned} S_i &= CK_{норм} + (DK_{ср} + XK_{ср} + a)t_0; \\ C_{тр} &= B_0 z_1. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Более выгодным будет вариант с меньшими значениями B_{ST_0} или B_{SE} . Научные исследования и производственный опыт ряда дорожных организаций указывают на принципиальную возможность широкого использования местных дорожно-строительных материалов при строительстве экономичных и долговечных дорожных одежд на автомобильных дорогах различных категорий. Конструктивные схемы дорожных одежд должны быть объединены по степени капитальности в равнопрочные группы с одинаковыми для каждой группы эквивалентными модулями деформации [6, 7].

Для каждой группы дорожных одежд с учетом категории дороги принят требуемый эквивалентный модуль деформации, соответствующий легкому и среднему автомобильному движению [8]. Дополнительно учитываются данные о строительной стоимости и затратах привозных и местных материалов. Данные о ежегодных дорожно-эксплуатационных рас-

ходах, отчислениях на восстановление и переустройство дорог и себестоимости перевозок, вплоть до накопления данных о службе дорожных одежд с местными материалами, можно получить из табл. 2–5 [1].

Выявление технико-экономической целесообразности применения местных материалов должно начинаться на стадии конструирования дорожной одежды. Основным критерием допустимости применения местного материала в соответствующем конструктивном слое является равнопрочность рассматриваемых конструкций дорожных одежд или отдельных конструктивных слоев, устраиваемых из местных и привозных материалов [9].

Согласно теории прочности нежестких одежд, равнопрочными считаются те конструктивные слои или многослойные системы, которые обладают одинаковой жесткостью и распределяющей способностью при действии одинаковых нагрузок [10]. Для равнопрочных систем должно существовать равенство их эквивалентных модулей деформации

$$E_{экр}^M = E_{экр}^П, \quad (12)$$

где $E_{экр}^M, E_{экр}^П$ – эквивалентный модуль деформации конструкции с местным и привозным материалами.

Эквивалентный модуль деформации многослойной системы зависит от модулей деформации каждого слоя, толщины слоев и модуля деформации грунтового основания. Используя принцип эквивалентности систем, можно заменять отдельные конструктивные слои дорожной одежды, устраиваемые из определенных материалов, эквивалентными по жесткости слоями из других материалов, увеличивая или уменьшая их толщину в зависимости от прочностных характеристик последних. Толщина эквивалентного слоя, приведенного к материалу грунтового основания, вычисляется по формуле Г. И. Покровского [2]

$$h_{экр} = h \cdot 2,5 \sqrt{\frac{E_1}{E_0}}, \quad (13)$$

где $h_{экр}$ – толщина эквивалентного слоя; h – толщина слоя материала с модулем деформации E ; E_0 – модуль деформации грунта основания.

Для случая применения привозного и местного материалов толщина эквивалентного слоя определяется соответственно по формулам:

$$h_{\text{экв}}^{\text{п}} = h \cdot 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{п}}}{E_0}}; \quad (14)$$

$$h_{\text{экв}}^{\text{м}} = h \cdot 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{м}}}{E_0}}. \quad (15)$$

Исходя из условия равнопрочности конструкций с местными и привозными материалами, можно написать основное условие технической целесообразности в следующем виде:

$$h_{\text{экв}}^{\text{м}} = h_{\text{экв}}^{\text{п}}. \quad (16)$$

Стоимость устройства единицы площади основания в общем случае

$$S = A + hc, \quad (17)$$

где A – расход на устройство 1 м^2 основания, не зависящий от вида каменного материала; h – толщина слоя, м; c – стоимость 1 м^3 материала франко-трасса.

Тогда:

$$S_{\text{м}} = A_1 + h_{\text{м}}c_{\text{м}}; \quad S_{\text{п}} = A_2 + h_{\text{п}}c_{\text{п}}. \quad (18)$$

где $A_1 + h_{\text{м}}c_{\text{м}} \leq A_2 + h_{\text{п}}c_{\text{п}}$, $A_1 \approx A_2$.

Критерий экономической целесообразности использования местного материала может быть записан в виде неравенства:

$$S_{\text{м}} \leq S_{\text{п}}; \quad (19)$$

$$\frac{h_{\text{п}}}{h_{\text{м}}} \geq \frac{c_{\text{м}}}{c_{\text{п}}}. \quad (20)$$

Исходя из (19), (20), будем иметь:

$$h_{\text{м}} \cdot 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{м}}}{E_0}} = h_{\text{экв}}^{\text{м}} = h_{\text{п}} \cdot 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{п}}}{E_0}}; \quad (21)$$

$$\frac{h_{\text{п}}}{h_{\text{м}}} = 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{м}}}{E_{\text{п}}}}. \quad (22)$$

Подставляя в (22) значение $h_{\text{п}}/h_{\text{м}}$, в окончательном виде получим нужное для технико-экономических сравнений уравнение

$$\frac{c_{\text{м}}}{c_{\text{п}}} \leq 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{м}}}{E_{\text{п}}}}. \quad (23)$$

В уравнении (23) значения $c_{\text{м}}/c_{\text{п}}$ могут изменяться от 1 до 0. Практические пределы изменности этого отношения уже значительны. Границы предельно допустимых значений $c_{\text{м}}/c_{\text{п}}$ и $E_{\text{м}}/E_{\text{п}}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Границы предельно допустимых значений
Limits of maximum permissible values

$c_{\text{м}}/c_{\text{п}}$	1,000	0,900	0,800	0,700	0,600	0,500	0,400
$E_{\text{м}}/E_{\text{п}}$	1,000	0,768	0,606	0,410	0,279	0,177	0,101

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, для выполнения технико-экономического сравнения необходимо знать расчетные модули деформаций сравниваемых материалов. Следует иметь в виду, что расчетные значения модулей деформации зависят не только от свойств материала, но и от условий увлажнения и дренирования, режима промерзания и оттаивания.

2. При назначении расчетных модулей деформации необходимо пользоваться соответствующими таблицами и рекомендациями инструкции по назначению конструкций дорожных одежд нежесткого типа ВСН 46–60. Приводимые в таблицах значения модулей не могут учесть все многообразие условий и расширяющийся ассортимент местных материалов. В некоторых случаях возникает необходимость определения расчетного модуля деформации местного материала экспериментальным путем. При этом следует иметь в виду, что в процессе эксплуатации дороги материал конструктивного слоя будет измельчаться и изменять свою первоначальную прочность, оцениваемую модулем деформации. В связи с чем величину расчетного модуля деформации рекомендуется определять непосредственно в полевых условиях на существующих участках дороги, построенных из этих материалов.

3. Сведения о стоимости 1 м^3 материала франко-трасса получают составлением соответствующих калькуляций. Сравнение сводится к установлению на графике (рис. 1) местонахождения точки, соответствующей полученным

численным значениям $E_M/E_{П}$ и $c_M/c_{П}$. Если точка располагается в зоне технико-экономического обоснования, то местный материал можно использовать в проектируемой конструкции дорожной одежды.

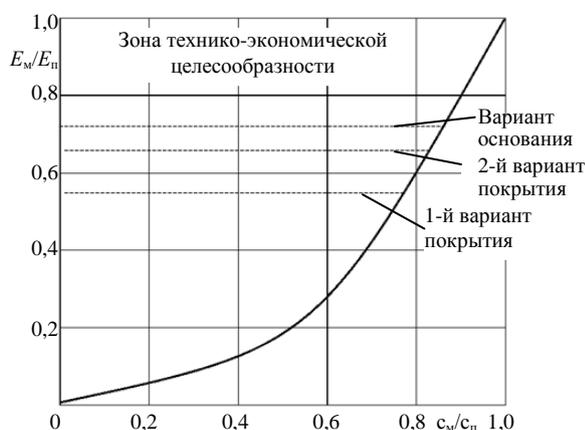


Рис. 1. Предварительное определение технико-экономической целесообразности применения местных материалов в конструктивных слоях дорожных одежд

Fig. 1. Preliminary determination of technical and economic feasibility for application of local materials in structural layers of pavement

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорошилов, Н. Ф. Транспортно-эксплуатационная оценка основных элементов автомобильных дорог при разработке проектно-сметной документации / Н. Ф. Хорошилов // Труды СоюздорНИИ. М., 1968. Вып. 19. С. 3.
2. Рациональные конструкции дорожных одежд из местных материалов Поволжья. Саратов: Изд-во Саратов. политех. ин-та, 1966. Вып. 21. С. 168–180.
3. Золотарь, И. А. Экономико-математические методы в дорожном строительстве / И. А. Золотарь. М.: Транспорт, 1974. 248 с.
4. Методические рекомендации по оценке эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию автомобильных дорог: ВСН 21–83. М.: Транспорт, 1985.
5. Голубова, О. С. Экономика строительства / О. С. Голубова, С. В. Валицкий. Минск: ТетраСистемс, 2010. 172 с.
6. Леонович, И. И. Формулы и зависимости для решения дорожных и транспортных задач / И. И. Леонович, Н. П. Вырко, П. А. Лыщик. Минск: Высш. шк., 1974. 479 с.

7. Коганзон, М. С. Оценка и обеспечение прочности дорожных одежд нежесткого типа / М. С. Коганзон, Ю. М. Яковлев. М.: МАДИ, 1990. 53 с.
8. Семенов, В. А. Качество и однородность автомобильных дорог / В. А. Семенов. М.: Транспорт, 1989. 123 с.
9. Горельшев, Н. В. Материалы и изделия для строительства дорог / Н. В. Горельшев, И. Л. Гурычков, Е. Р. Пинус. М.: Транспорт, 1986. 288 с.
10. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа: ВСН 46–83. М.: Транспорт, 1985.

Поступила 27.05.2021

Подписана в печать 28.07.2021

Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

1. Khoroshilov N. F. (1968) Transport Andoperational Assessment of Main Elements of Highways in the Development of Design and Estimate Documentation. *Trudy SoyuzdorNII* [Proceedings of SoyuzdorNII]. Moscow, Iss. 19, 3 (in Russian).
2. *Rational Designs of Pavements From Local Materials of the Volga Region*. Saratov, Publishing House of Saratov Polytechnical Institute, 1966, Iss. 21, 168–180 (in Russian).
3. Zolotar I. A. (1974) Economic and Mathematical Methods in Road Construction. Moscow, Transport Publ. 248 (in Russian).
4. VSN [Industry-Specific Construction Standards] 21–83. *Methodological Recommendations for Assessing Effective Capital Investments in the Construction and Reconstruction of Highways*. Moscow, Transport Publ., 1985 (in Russian).
5. Golubova O. S., Valitskii S. V. (2010) *Construction Economics*. Minsk, TetraSystems Publ. 172 (in Russian).
6. Leonovich I. I., Vyrko N. P., Lyschik P. A. (1974) *Formulas and Dependencies for Solving Road and Transport Problems*. Minsk, Vysshaya Shkola Publ. 479 (in Russian).
7. Koganzon M. S., Yakovlev Yu. M. (1990) *Assessment and Assurance of Strength of Non-Rigid Road Pavements*. Moscow, State Technical University – MADI. 53 (in Russian).
8. Semenov V. A. (1989) *Quality and Uniformity of Roads*. Moscow, Transport Publ. 123 (in Russian).
9. Gorelyshev N. V., Guryachkov I. L., Pinus E. R. (1986) *Materials and Products for Road Construction*. Moscow, Transport Publ. 288 (in Russian).
10. VSN [Industry-Specific Construction Standards] 46–83. *Guidelines for Design of Non-Rigid Pavements*. Moscow, Transport Publ., 1985 (in Russian).

Received: 27.05.2021

Accepted: 28.07.2021

Published online: 30.09.2021