

НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 625.1:656.2.022.846

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОГО УХИЛУ ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ МАГІСТРАЛЕЙЧЕРНИШОВА О. С.^{1*}, к. т. н., доц.,КОВАЛЬОВ В. В.^{2*}, к. т. н., доц.^{1*} Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Ак. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (066) 3879565, e-mail: okschernysh@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8132-2153^{2*} Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Ак. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (068) 9068642, e-mail: kov-vyach@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

Анотація. Постановка проблеми. У залізничному будівництві, зокрема, й під час проектування високошвидкісних магістралей вибір максимального ухилу стає складною проблемою, адже від його величини залежить низка експлуатаційних та будівельних показників. Вибір рішення пов'язаний із трудомісткими розрахунками, які спрощуються за рахунок застосування економіко-математичних моделей. Наявні моделі дозволяють обирати найраціональніші проектні варіанти, але не враховують обсяги фінансування на будівництво, які нерідко бувають обмеженими. Така ситуація може ускладнити вибір кращого варіанта та потребує додаткового дослідження. **Мета статті** - розробити модель, що дозволить обирати раціональні параметри поздовжнього профілю під час проектування високошвидкісних магістралей в Україні з урахуванням рівня фінансування. **Висновок.** Розроблено методику раціонального вибору ефективного проектного варіанта, яка базується на математичній моделі і відрізняється від існуючих тим, що дозволяє раціонально розподіляти кошти з урахуванням обмеженого інвестування проектів, що буде сприяти реалізації державних програм у галузі залізничного транспорту з питань підвищення швидкості руху й економії енергоресурсів на тягу поїздів.

Ключові слова: високошвидкісна магістраль, максимальний ухил, капітальні вкладення, експлуатаційні витрати, оптимізація, раціональне значення

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО УКЛОНА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙЧЕРНЫШОВА О. С.^{1*}, к. т. н., доц.,КОВАЛЕВ В. В.^{2*}, к. т. н., доц.^{1*} Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Ак. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (066) 3879565, e-mail: okschernysh@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8132-2153^{2*} Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Ак. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (068) 9068642, e-mail: kov-vyach@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

Аннотация. Постановка проблемы. В железнодорожном строительстве, в частности, и при проектировании высокоскоростных магистралей выбор максимального уклона – сложная проблема, ведь от его величины зависит ряд эксплуатационных и строительных показателей. Выбор решения связан с трудоемкими расчетами, которые упрощаются при применении экономико-математических моделей. Существующие модели позволяют выбирать наиболее рациональные проектные варианты, но не учитывают объемы финансирования на строительство, которые нередко бывают ограниченными. Такая ситуация может значительно усложнить выбор наилучшего варианта и требует дополнительного исследования. **Цель статьи** - разработать модель, которая позволила бы выбирать рациональные параметры продольного профиля при проектировании высокоскоростных магистралей в Украине с учетом уровня финансирования. **Вывод.** Разработана методика рационального выбора эффективного проектного варианта, которая базируется на математической модели и отличается от существующих тем, что позволяет рационально распределять средства с учетом ограниченного инвестирования проектов. Применение разработанной методики будет способствовать реализации государственных программ по вопросам повышения скорости движения и экономии энергоресурсов в железнодорожной отрасли.

Ключевые слова: высокоскоростная магистраль, максимальный уклон, капитальные вложения, эксплуатационные затраты, оптимизация, рациональное значение

CHOICE OF RATIONAL VALUES OF MAXIMUM SLOPE IN DESIGN HIGH-SPEED LINES

CHERNYSHOVA O. S.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass.-prof.*,

KOVALOV V. V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass.-prof.*

^{1*} Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, st. Ac. Lazaryan, 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (066) 3879565, e-mail: okschernysh@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8132-2153

^{2*} Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, st. Ac. Lazaryan, 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (068) 9068642, e-mail: kov-vyach@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

Summary. Raising of problem In railway construction, in particular, the design of high-speed lines, the choice of the maximum gradient – a complex problem, because of its size depends on a number of operational and construction parameters. Selecting solutions associated with time-consuming calculations are simplified by the use of econometric models. Existing models allow you to choose the most rational design options, but do not include funding for the construction, which are often limited. Such a situation could complicate the choice of the best option, and requires further study. **Purpose.** To develop a model that would allow to choose rational parameters of the longitudinal profile in the design of high-speed railways in Ukraine, taking into account the level of funding. **Conclusion.** To develop a methodology of rational choice effective design options, which is based on a mathematical model and differs from existing in that it allows a rational distribution of funds in view of the limited investment projects. The application of the developed technique will facilitate implementation of state programs on improving the speed and energy savings in the railway industry.

Keywords: *high-speed line, the maximum slope, capital expenditures, operating costs, optimization, rational value*

Постановка проблеми. У залізничному будівництві, зокрема, й під час проектування високошвидкісних магістралей для вибору найефективнішого проектного рішення необхідно розглянути значну кількість варіантів. Варіанти можуть розрізнятися положенням траси, кількістю головних колій, розташуванням роздільних пунктів, величиною максимального ухилу поздовжнього профілю та низкою інших показників [10]. Вибір максимального ухилу – складна проблема, адже від його величини залежить низка експлуатаційних та будівельних показників. Прийняття рішення пов'язане з трудомісткими розрахунками, які спрощуються за рахунок застосування економіко-математичних моделей. Залежно від мети, поставленої перед проектувальником, при варіантному проектуванні можна досягти скорочення початкових інвестиційних витрат, вартості будівельних робіт, термінів будівництва та ін. Наявні моделі дозволяють обирати найраціональніші проектні варіанти, але не враховують обсяги фінансування на будівництво, які нерідко бувають обмеженими. Така ситуація може ускладнити вибір кращого варіанта і потребує додаткового дослідження.

Аналіз публікацій. Нормативні параметри у проектуванні високошвидкісних магістралей у різних країнах

світу суттєво різняться [4; 5; 8; 11–13]. Це зумовлено низкою причин: різним рівнем проектної швидкості, відмінностями характеристик рухомого складу, та, зокрема, особливостями проектування плану і поздовжнього профілю, що пов'язані, насамперед, з умовами рельєфу. Але слід зауважити, що більш жорсткі вимоги до проектування плану та поздовжнього профілю не завжди дозволяють забезпечити вищий рівень швидкості руху поїздів. Чимало уваги науковці присвятили формуванню схеми перспективних напрямків для будівництва високошвидкісних магістралей в Україні. Але обґрунтування норм проектування українських високошвидкісних залізниць на сьогодні ще у процесі розробки. У праці [9] детально розглянуто проблему вибору величини максимального ухилу поздовжнього профілю та її впливу на економічні показники варіантів. Також запроєктовано низку варіантів із різними проектними параметрами й оцінено потрібні інвестиції та очікувані експлуатаційні витрати, що в подальшому дозволить визначити найвпливовіші параметри проектування.

Мета статті. На підставі теоретичних розрахунків та із застосуванням кореляційного і векторного аналізу розробити модель, що дозволить обирати раціональні

параметри поздовжнього профілю для проектування високошвидкісних магістралей в Україні з урахуванням можливого фінансування.

Виклад матеріалу. Для оцінки варіантів головні критерії – економічні. Тому на підставі розглянутих у праці [9] варіантів високошвидкісної магістралі та з метою виявлення проектних параметрів, що найбільш суттєво впливають на капітальні вкладення і експлуатаційні витрати, проведено кореляційний аналіз, результати якого наведено в табличному вигляді (табл. 1).

Таблиця 1

Результати кореляційного аналізу

Дослідні показники	Параметри			
	Максимальний ухил	Мінімальний радіус кривої	Кількість кривих	Обсяги земляних робіт
Довжина лінії	-0,56	-0,44	0,12	0,34
Час руху	-0,58	-0,56	0,19	-
Витрати електроенергії	-0,42	-0,21	0,02	-
Капітальні вкладення	-0,57	-0,43	0,19	0,62
Експлуатаційні витрати	0,63	-0,26	0,21	-

Як видно з таблиці 1, на капітальні вкладення та експлуатаційні витрати найсуттєвіше впливає величина керівного ухилу. Вплив від величини мінімального радіуса та кількості кривих менш наявний, що зумовлено великими значеннями проектних радіусів [9]. Тому у подальших розрахунках за критерії оцінки для вибору кращого варіанта прийнято такі показники: максимальний ухил, експлуатаційні витрати, капітальні вкладення.

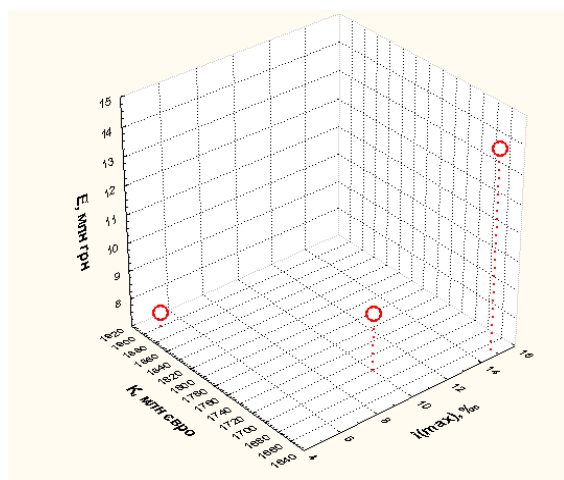


Рис. 1. Набір варіантів, що характеризуються різними параметрами

За великої кількості намічених варіантів задача вибору кращого проектного рішення ускладнюється, тому для її розв'язання застосовано елементи векторного аналізу. На рисунку 1 наведено набір варіантів траси, що характеризується трьома проектними варіантами з різними показниками.

Для визначення найкращого варіанта розв'язано задачу векторної оптимізації, основні положення якої викладено у роботах [1–3; 6; 7].

Множина проектних варіантів позначена через $B \in A(\Omega)$, кожен з яких оцінюється за допомогою трьох показників: необхідних капітальних вкладень на будівництво ($K(B)$), розміру щорічних експлуатаційних витрат ($E(B)$), максимального проектного ухилу ($i_{\max}(B)$). Вибираючи найкращий варіант, показники $E(B)$ та $i_{\max}(B)$ бажано отримати якомога меншими, а $K(B)$ обмежується певним значенням $K_{\max}$, тобто:

$$\begin{pmatrix} E(B) \\ i_{\max}(B) \end{pmatrix} \rightarrow \min, \quad (1)$$

при цьому

$$K \leq K_{\max}. \quad (2)$$

Якщо на множині дослідних ділянок виконується умова:

$$\begin{aligned} E(B_i) &\leq E(B_j); \\ i_{\max}(B_i) &\leq i_{\max}(B_j); \\ i &\neq j, i = 1, n \end{aligned} \quad (3)$$

де n - кількість варіантів із множини B , тоді всі ділянки порівнянні між собою за Парето.

Дві ділянки B_1 та $B_2 \in A(\Omega)$ називають непорівнянними, якщо серед множини (3) є хоча б одна строга протилежна нерівність. Виходячи з умови (1), оцінка множині $B \in A(\Omega)$ надається за допомогою векторів $E(B)$ та $i_{\max}(B)$. Задача відбору за правилом (3) і є задачею векторної оптимізації. Множину $b \in A(\Omega)$ названо рішенням задачі

векторної оптимізації (3), якщо будь-які дві ділянки B_1 та B_2 з $b \in$ непорівнянними.

На непорівнянні варіанти накладено обмеження типу:

$$\forall B \in b \rightarrow B \in D(\Omega) \subseteq A(\Omega), \quad (4)$$

де $D(\Omega) = K_{\max}$ – набір допустимих множин з $A(\Omega)$.

Обмеження, накладене на дослідні варіанти, передбачає можливість установлювати допустимі значення капітальних вкладень, з урахуванням яких визначаються непорівнянні варіанти.

Співвідношення (4) розглядалося як ще одне правило відбору і тоді дана задача векторної оптимізації має два критерії – (3) та (4). У даному випадку задача векторної оптимізації є двокритеріальною.

Застосування запропонованої моделі векторної оптимізації дозволяє відсіювати неефективні варіанти. На рисунку 2 схематично показано, яким чином обираються варіанти. Наприклад, бажано отримати якомога менший ухил $i_{\max}$ і мінімальні експлуатаційні витрати E . З рисунка 2 видно, що для цього необхідні певні максимальні капітальні вкладення $K_{\max}$. Якщо ж замість необхідних максимальних вкладень $K_{\max}$ маємо обмежені K_0 , то при розподілі їх будуть отримані відповідні експлуатаційні витрати E_0 і максимальний ухил $i_{\max(0)}$, і т. д.

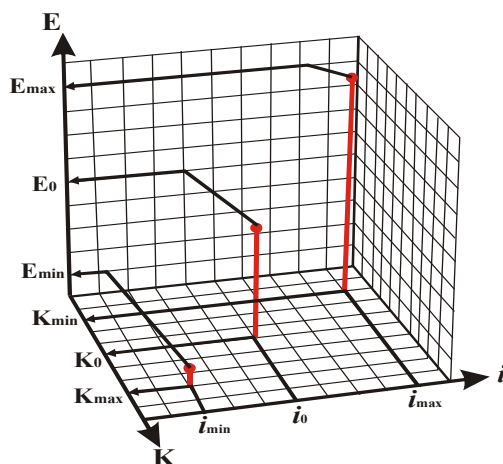


Рис. 2. Приклад вибору найкращого варіанта

Для розв'язання даної задачі векторної оптимізації розроблено відповідне

програмне забезпечення за допомогою пакета Maple, яке дозволяє обирати непорівнювані варіанти взагалі та з урахуванням рівня обмеження капітальних вкладень. Детальна послідовність роботи у програмі наведена на рисунку 3. Спочатку вводяться вихідні дані: кількість варіантів, очікувані експлуатаційні витрати, максимальний проектний ухил і в останню чергу – капітальні вкладення на будівництво.

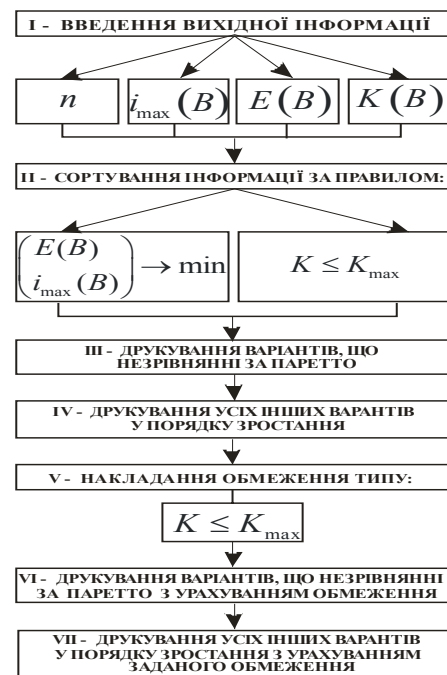


Рис. 3. Алгоритм визначення раціонального проектного варіанта

У розв'язанні задачі капітальні вкладення на будівництво вважаються обмеженими і перебір виконується з урахуванням максимально допустимого значення K_0 . Таким чином, можна задавати будь-які обмеження за капітальними вкладеннями та отримувати кращі варіанти в заданих фінансових умовах. Розв'язання задачі векторної оптимізації дозволяє знаходити раціональні варіанти навіть за обмеженого фінансування.

Висновки. Розроблено методику раціонального вибору ефективного проектного варіанта, яка базується на математичній моделі і відрізняється від існуючих тим, що дозволяє раціонально розподіляти кошти з урахуванням обмеженого інвестування проектів, що сприятиме реалізації державних програм у галузі залізничного транспорту з питань

підвищення швидкості руху і економії енергоресурсів на тягу поїздів. Це дозволить зменшити трудомісткість розрахунків та відкидати заздалегідь неефективні варіанти на передпроектній стадії.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Босов А. А. Підвищення ефективності роботи транспортної системи на основі структурного аналізу : монографія / А. А. Босов, Н. А. Мухіна, Б. П. Піх ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : ДПТ, 2005. – 200 с.
2. Босов А. А. Формирование вариантов рациональной сети линий высокоскоростного движения поездов в Украине / Босов А. А., Кирпа Г. Н. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2004. – 144 с.
3. Есипов Б. А. Методы оптимизации и исследование операций. Конспект лекций / Б. А. Есипов. – Самара : СГАУ, 2007. – 90 с.
4. Железные дороги мира в XXI веке : монография / Г. Н. Кирпа, В. В. Корниенко, А. Н. Пшинько, Е. П. Блохин, Б. Е. Боднар, С. В. Мямлин, В. Н. Плахотник, И. П. Корженевич ; под общ. ред. Г. Н. Кирпы. – Днепропетровск : ДНУЗТ, 2004. – 224 с.
5. Кирпа Г. М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему : монографія / Г. М. Кирпа. – 2-ге вид., перероб. і допов. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2004. – 248 с.
6. Курган М. Б. Встановлення раціональної послідовності усунення обмежень швидкості, зумовлених станом залізничної колії / М. Б. Курган, Н. А. Мухіна, О. С. Чернишова // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 25. – С. 72–75.
7. Курган М. Б. Раціональна послідовність усунення обмежень швидкості руху поїздів / М. Б. Курган, О. С. Чернишова // Тезиси докладов 69 Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» / М-во трансп. и связи Украины, Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, Вост. науч. центр трансп. акад. Украины. – Днепропетровск, 2009. – С. 157–158.
8. Юхина В. Ю. Проектирование трассы высокоскоростных магистралей в условиях сложного рельефа : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / Юхина Вита Юрьевна ; Москов. гос. ун-т путей сообщений. – Москва, 2007. – 22 с.
9. Чернишова О. С. Економічне обґрунтування максимального ухилу при проектуванні високошвидкісних магістралей / О. С. Чернишова, В. В. Ковальов, М. М. Яшук, О. В. Хойц // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ, 2016. – № 4. – Режим доступу: visnyk.pgssas.dp.ua.
10. Экономические изыскания и основы проектирования железных дорог / Б. А. Волков, И. В. Турбин, Е. С. Свинцов, Н. С. Лобанов ; под. общ. ред. Б. А. Волкова. – Москва : Маршрут, 2005. – 408 с.
11. Zuber W. High Speed Rail in Europe – A Three Decade Success Story / W. Zuber // High Speed Rail. – 2011. – Iss. 73. – P. 8–11. – Available at: <http://docplayer.net/5923499-N-e-t-w-o-r-k-high-speed-rail-p-a-r-s-o-n-s-b-r-i-n-c-k-e-r-h-o-f-f.html>.
12. Master ferroviaire LGV pour l'Ukraine et la Russie. Module Infrastructure. Les études et la conception des LGV – Le profil en long de la LGV / Société Nationale des Chemins de fer Français. – Paris, 2014. – 16 p.
13. California High-Speed Rail Authority. Technical Memorandum. Alignment Design Standards for High-Speed Train Operation TM 2.1.2 / Parsons Brinckerhoff ; prepared by George Harris ; checked by Dominique Rulens ; approved by Ken Jong ; released by Anthony Daniels. – Sacramento, California, 2009. – 43 p. – (California High-Speed Train Project). – Available at: http://www.hsr.ca.gov/docs/programs/eir_memos/Proj_Guidelines_TM2_1_2R00.pdf.

REFERENCES

1. Bosov A.A., Mukhina N.A. and Pikh B.P. *Pidvishchennia efektyvnosti roboty transportnoi sistemi na osnovi strukturnoho analizu* [Improving the efficiency of the transport system based on structural analysis]. Dnipropetr. nats. un-t zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana [Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. Dnipropetrovsk: DIIT, 2005, 200 p. (in Ukrainian).
2. Bosov A.A. and Kirpa G.N. *Formirovanie variantov ratsionalnoj seti linij vysokoskorostnogo dvizheniya poezdov v Ukraine* [Formation of rational choices transmission network of high-speed trains in Ukraine]. Dnipropetrovsk: DNUZhT, 2004, 144 p. (in Russian).
3. Esipov B.A. *Metody optimizatsii i issledovanie operatsij* [Optimization methods and operations research]. Samara: SGAU, 2007, 90 p. (in Russian).
4. Kirpa G.N., Kornienko V.V., Pshinko A.N., Blokhin E.P., Bodnar B.E., Myamlin S.V., Plakhotnik V.N. and Korzhenevich I.P. *Zheleznye dorogi mira v XXI veke* [The railways of the world in the XXI century]. Dnipropetrovsk, DNUZhT, 2004, 224 p. (in Russian).
5. Kirpa G.M. *Integratsiia zaliznichnoho transportu Ukrainy u Evropeisku transportnu systemu* [Integration of railway transport of Ukraine in the European transport system]. Dnipropetrovsk: DNUZT, 2004, 248 p. (in Ukrainian).
6. Kurhan M.B., Mukhina N.A. and Chernyshova O.S. *Vstanovlennia ratsionalnoi poslidoynosti usunennia obmezhen shvidkosti, zumovlenikh stanom zaliznichnoi kolii* [Establishing a rational sequence eliminate speed limits due to the

- state of the railway line]. *Visnik Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zalizничного transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. 2008, iss. 25, pp. 72–75. (in Ukrainian).
7. Kurhan M. B. and Chernishova O.S. *Ratsionalna poslidovnist usunennia obmezhen shvidkosti rukhu poizdiv* [Rational consistency elimination of trains speed limits]. *Tezisy dokladov 69 Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta»* [Problems and prospects of rail transport: Abstracts 69th International Scientific Conference]. *M-vo transp. i svyazi Ukrainy, Dnepropetr. nats. un-t zh.-d. transp. im. akad. V. Lazaryana, Vost. nauch. tsentr transp. akad. Ukrainy* [Ministry of Transport and Connection of Ukraine, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Eastern Research Centre of Transport Academy of Ukraine]. Dnepropetrovsk, 2009, pp. 157-158. (in Ukrainian).
 8. Yuhina V.Yu. *Proektirovanie trassy vysokoskorostnykh magistralei v usloviyakh slozhnogo rel'efa: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.22.06* [Design of high-speed railways tracks in difficult terrain. Author's abstract from Cand. Sc. (Tech.) Dissertation: 05.22.06]. *Moskov. gos. un-t putej soobshchenij* [Moscow State Transport University]. Moskva, 2007, 22 p. (in Russian).
 9. Chernyshova O.S., Kovalev V.V., Yashchuk M.M., Khoits O.V. *Ekonomichne obhruntuvannia maksimalnogo ukhlylu pry proektuvanni vysokoshvydkisnykh mahistralei* [Economic reasining maximum slope in design high-speed lines]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprov'ska State Academy of Construction and Architecture]. Dnipropetrovsk, 2016, iss. 4. Available at: visnyk.pgasa.dp.ua. (in Ukrainian).
 10. Volkov B.A., Turbin I.V., Svintsov E.S., Lobanov N.S. *Ekonomicheskie izyskaniya i osnovy proektirovaniya zheleznykh dorog* [Economic research and design principles of railways]. Moskva: Marshrut, 2005, 408 p. (in Russian).
 11. Zuber W. *High Speed Rail in Europe – A Three Decade Success Story*. High Speed Rail. 2011, iss. 73, pp. 8-11. Available at: <http://docplayer.net/5923499-N-e-t-w-o-r-k-high-speed-rail-p-a-r-s-o-n-s-b-r-i-n-c-k-e-r-h-o-f-f.html>.
 12. Master ferroviaire LGV pour l'Ukraine et la Russie. Module Infrastructure. Les études et la conception des LGV – Le profil en long de la LGV. Société Nationale des Chemins de fer Français. Paris, 2014, 16 p. (in French).
 13. Brinckerhoff P., Harris G., Rulens D., Jong K. and Daniels A. *California High-Speed Rail Authority. Technical Memorandum. Alignment Design Standards for High-Speed Train Operation TM 2.1.2*. (California High-Speed Train Project). Sacramento, California, 2009, 43 p. Available at: http://www.hsr.ca.gov/docs/programs/eir_memos/Proj_Guidelines_TM2_1_2R00.pdf.

Рецензент: д-р т. н., проф. Заренбін В. Г.

Надійшла до редколегії: 12.04.2016 р. Прийнята до друку: 17.04. 2016 р.