УДК 625.03 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.165.2016.87780

ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ НА ЧЕТВЕРТІЙ ФАЗІ ПРОХОДЖЕННЯ ВАГОНОМ СТИКОВОЇ НЕРІВНОСТІ

Д-р техн. наук В. П. Шпачук, кандидати техн. наук О. О. Чупринін, А. О. Гарбуз, інженер Т.О. Супрун

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ЧЕТВЕРТОЙ ФАЗЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВАГОНОМ СТЫКОВОЙ НЕРОВНОСТИ

Д-р техн. наук В. П. Шпачук, кандидаты техн. наук А. А. Чупрынин, А. О. Гарбуз, инженер Т. О. Супрун

FEATURES OF DYNAMIC INTERACTIONS IN THE FOURTH PHASE OF THE PASSAGE OF THE WAGON BUTT ROUGHNESS

Dr. sc. sciences V. Shpachuk, the candidate tehn. sciences A. Chuprynin, A. Garbuz, engineer T. Suprun

Досліджено динамічну взаємодію рейкової колії та вагона в момент проходження стикової нерівності на четвертій фазі руху. Запропоновано модель транспортного механічного комплексу “вагон-рейкова колія”. Визначено прогин віддавальної рейки під першою шпалою при різноманітних швидкостях та завантаженні вагона.

***Ключові слова**: вагон, рейкова колія, стикова нерівність, фаза руху, багатопрогонова балка, жорсткість балки, пружні опори.*

Исследовано динамическое взаимодействие рельсовой колеи и вагона в момент прохождения стыковой неровности на четвертой фазе движения. Предложена модель транспортного механического комплекса “вагон-рельсовый путь”. Определен прогиб под первой шпалой принимающего рельса при различных скоростях и загрузке вагона.

***Ключевые слова**: вагон, рельсовая колея, стыковая неровность, фаза движения, многопролетная балка, жесткость балки, упругие опоры.*

The carried research is aimed at the establishment and analysis of the laws of the mechanical interaction in transport mechanical complex "train - rail track” through deflection of the receiving rail for the first railway sleeper considering the motion phases of the car in the place of a butt joint, as well as operational, mechanical and vehicle construction parameters and the top permanent way.

To achieve this goal the following tasks were solved: with the help of modeling methods considered mechanical system is represented as a multi-span beam on elastic supports. Splice-piece is elastic element at the end of the receiving or donating rail, the spring constant of which is determined in the view of its plane stress. Also, considering the impact interaction of the fourth wheel in the wheelset with the receiving end of the rail car, which interacts with the receiving rail, considered as the sprung mass shown. At the same time the current height level of interface roughness is determined by taking into account the static interaction of a tram with a rail track on the fourth phase of the car movement, which is equivalent to finding of a wheelset receiving end of the rail car and three-wheeled set - at the receiving rail junction.

There was investigated the dynamic interaction between the track and the car at the time of passing the butt bumps in the fourth phase of the movement. We suggested a model of the complex

mechanical transport "train track". The deflection under the first sleeper of the receiving rail at different speeds and load the car was calculated.

Keywords: *carriage rail track, butt roughness, movement phase, multi-span beam, the stiffness of the beam, an elastic support.*

Вступ. Термін служби рухомого складу і верхньої будови колії залежить від спільної роботи всіх їх елементів, механічних, конструктивних і геометричних характеристик, умов їхньої експлуатації. Практика показує, що найбільш слабкою ланкою механічної системи «вагон–рейкова колія» є ізольовані стикові нерівності колії. При проходженні рейковим транспортним засобом стикової нерівності мають місце чотири фази руху вагона згідно з проходженням її відповідною колісною парою. Розглянуто особливості проходження вагоном зони стикової нерегулярності шляху на четвертій фазі руху.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.Механічну взаємодію вагона та рейкової колії проаналізовано в роботах [1-7], але в них не враховуються параметри не тільки статичної, а й динамічної взаємодії вагона з рейковою колією з урахуванням фаз руху вагона: коли на приймальній й віддавальній рейках шляху знаходиться кількість колісних пар, що залежить від фази руху транспортного засобу.

У роботах [8-9] дослідження обмежені лише першою, другою і третьою фазами руху вагона через стикову нерівність шляху. Це виключає можливість створення узагальненого наукового підходу до проблеми механічної взаємодії в системі "вагон-рейкова колія", що знижує ефективність практичного використання отриманих результатів.

Визначення мети та задачі дослідження. Проведені дослідження спрямовано на встановлення і аналіз закономірностей механічної взаємодії в транспортному механічному комплексі "вагон–рейкова колія" через прогини приймальної рейки під першою шпалою з урахуванням фаз руху вагона в місці стикового з'єднання й експлуатаційних, механічних і конструктивних параметрів транспортного засобу та верхньої будови колії.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: методами моделювання механічну систему, що розглядається, представлено у вигляді багатопрогонової балки на пружних опорах; стикову накладку – еквівалентним пружним елементом на кінці приймальної або віддавальної рейки, коефіцієнт жорсткості якої визначено з урахуванням її плоского напруженого стану. Також, враховуючи ударну взаємодію колеса четвертої колісної пари з торцем приймальної рейки, вагон, що взаємодіє з приймальною рейкою, розглянуто у вигляді підресореної зведеної маси. При цьому текуча висота ступеня стику нерівності визначається з урахуванням статичної взаємодії трамвая з рейковою колією на четвертій фазі руху вагона, що відповідає знаходженню однієї колісної пари на віддальній і трьох колісних пар – на приймальній рейках шляху [10].

Основна частина дослідження. Розглянуто динамічну взаємодію вагона з рейковою колією в зоні стику з урахуванням конструктивних та експлуатаційних факторів: висота стику, яка відповідає [1, 10] параметрам статичної взаємодії на четвертій фазі руху вагона, його завантаження та швидкість.

Схема стадії проходження четвертою колісною парою рейкового стику зображена на рис. 1: 1 – вагон; 2-5 – відповідне колесо колісної пари; 6-7 – центральна підвіска вагона; 8, 9 – приймальна і віддавальна рейки; 10 – пружні елементи баластового шару під шпалами; 11 – пружний елемент, який моделює жорсткість віддавальної рійки на кінці з урахуванням працюючої стикової накладки.

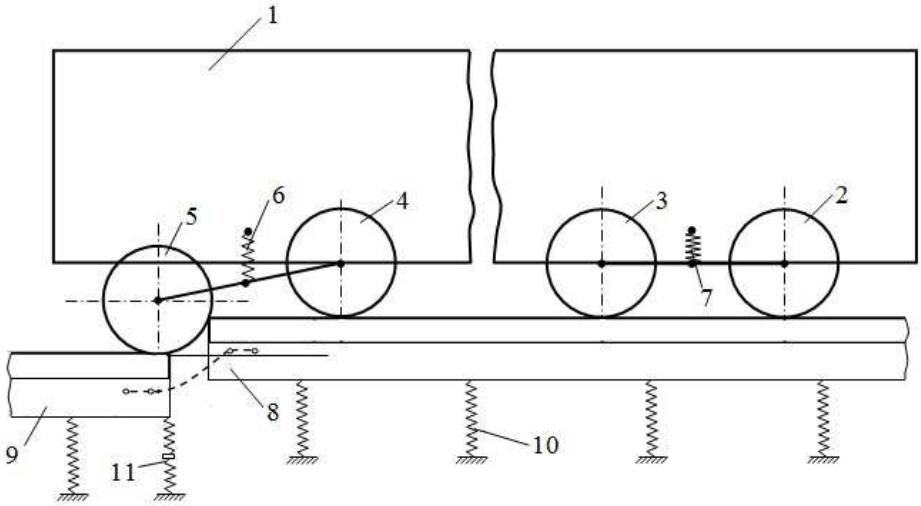

Рис. 1. Механічна схема вагона на четвертій фазі руху

Розрахункова механічна схема приймальної рейки на четвертій фазі руху вагона показана на рис. 2, де $c_{р.к.}$ – жорсткість рейки на кінці; c_1, b_1 – жорсткість та коефіцієнт демпфірування підвіски; c_2 – жорсткість баластового шару під рейкою; l_i (i=1÷22) – геометричні координати пружних опор; l_i^* (k =1÷3) – відстань від краю рейки відповідного колеса; m_1 – зведена маса колеса; m_2 – зведена маса вагона з урахуванням завантаження. Тут l_1^*=10,6 м; l_2^*=8,7 м; l_3^*=1,9 м; l_4^*=0; l_1=0,28 м; l_2=0,85 м; l_3=1,42 м; l_4=1,99 м; l_5=2,56 м; l_6=3,13 м; l_7=3,69 м; l_8=4,26 м; l_9=4,83 м; l_{10}=5,40 м; l_{11}=5,97 м; l_{12}=6,53 м; l_{13}=7,10 м; l_{14}=7,67 м; l_{15}=8,24 м; l_{16}=8,81 м; l_{17}=9,38 м; l_{18}=9,94 м; l_{19}=10,51 м; l_{20}=11,08 м; l_{21}=11,65 м; l_{22}=12,22 м.

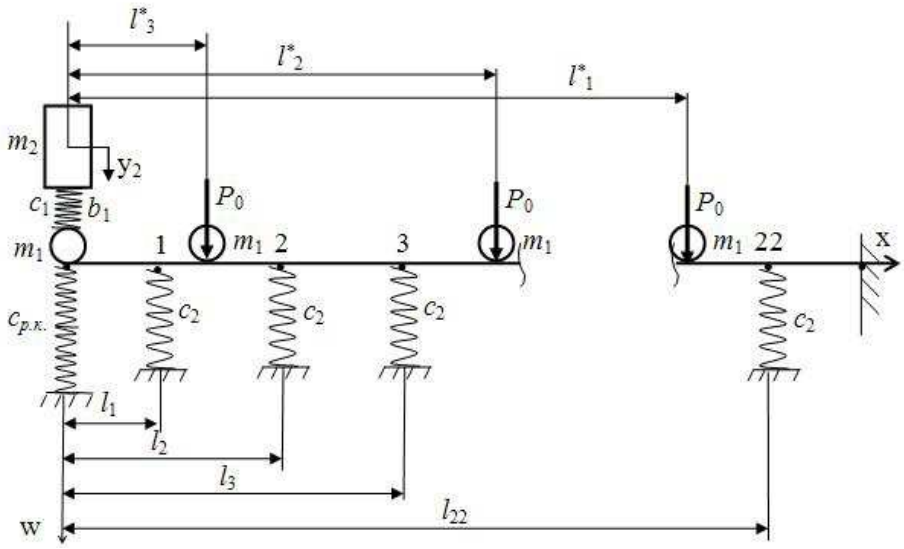

Рис. 2. Розрахункова структурна схема приймальної рейки на четвертій фазі руху

При дослідженні процесів динамічної взаємодії прийнято такі припущення, що не суперечать результатам робіт [1, 8-9]: коливання колісної пари та головки рейки відбуваються в безвідривному режимі (оскільки $m_2 >> m_1$, припущення прийнятне); прогини рейки реалізуються без порушення цілісності баластового шару (оскільки розглядаються деформаційні характеристики баластового шару під першою шпалою на фазі зростання прогинів приймальної рейки тільки вниз, припущення також прийнятне).

Для запропонованої моделі диференціальні рівняння коливань [1, 4, 11-12]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^4 w(t,x)}{\partial x^4} + \dfrac{\rho F}{EJ} \cdot \dfrac{\partial^2 w(t,x)}{\partial t^2} = \dfrac{c_1(y_2 - w(t,0))\delta(0)}{EJ} + \dfrac{b_1}{EJ}\left(\dfrac{\partial y_2}{\partial t} - \dfrac{\partial w(t,0)}{\partial t}\right)\delta(0) - \\ -\sum\limits_{i=1}^{22} \dfrac{c_2 w(t,l_i)\delta(x-l_i)}{EJ} - \sum\limits_{i=1}^{4} \dfrac{m_1}{EJ} \dfrac{\partial^2 w(t,l_i^*)\delta(x-l_i^*)}{\partial t^2} - \sum\limits_{i=1}^{3} \dfrac{P_0 w(t,l_i^*)\delta(x-l_i^*)}{EJ}; \\ m_2 \dfrac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1(y_2 - w(t,0)) + b_1\left(\dfrac{\partial y_2}{\partial t} - \dfrac{\partial w(t,0)}{\partial t}\right) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де $w(t,x)$ – прогин рейки;

$\delta(x)$ – імпульсна функція;

y_2 – переміщення зведеної маси вагона;

J – момент інерції перерізу рейки;

E – модуль пружності матеріалу рейки.

Розв’язання системи (1) виконується з застосуванням методу Фур’є поділу змінних, а також методів теорії операційного числення Лапласа-Карсона.

На рис. 3 наведено блок-схему розрахунку динамічних прогинів приймальної рейки.

Тут задаються механічні та геометричні характеристики, а також післяударна швидкість (при x=0). У якості висоти стику використовуються дані статичної взаємодії вагона з рейковою колією на четвертій фазі руху вагона [1, 10]. У схемі прогин $w(t,l_1)$ відповідає першій шпалі приймальної рейки.

Прогини системи розглядаються як суперпозиція власних форм коливань (блоки 2-7). Розрахунок починається з розгляду першої форми коливань (s=1, блок 2). У блоці 2 враховується, що місце прикладання ударного імпульсу збігається з початком координат. Пошук власних значень починається з нуля (блок 3). Якщо отримана точність виявляється недостатньою (блок 4), то варіюється крок за частотою (блок 5).

Далі виконується пошук подальшої власної частоти (блок 6), доки не будуть визначені всі задані форми коливань (п'ять перших форм, блок 7). У блоці 8 з урахуванням початкових умов визначаються вагові коефіцієнти кожної форми D_S. У результаті визначається функція прогинів (блок 9), яка використовується для знаходження максимального прогину під першою шпалою (x=l_1) приймальної рейки в початковий момент часу t=0 (блок 10). При збільшенні часу (блок 12) прогин починає зростати. Цей процес продовжується до тих пір, поки прогин не досягне максимального значення (блок 11). Далі прогин починає зменшуватися, що свідчить про закінчення процесу пошуку максимальних прогинів (блок 13).

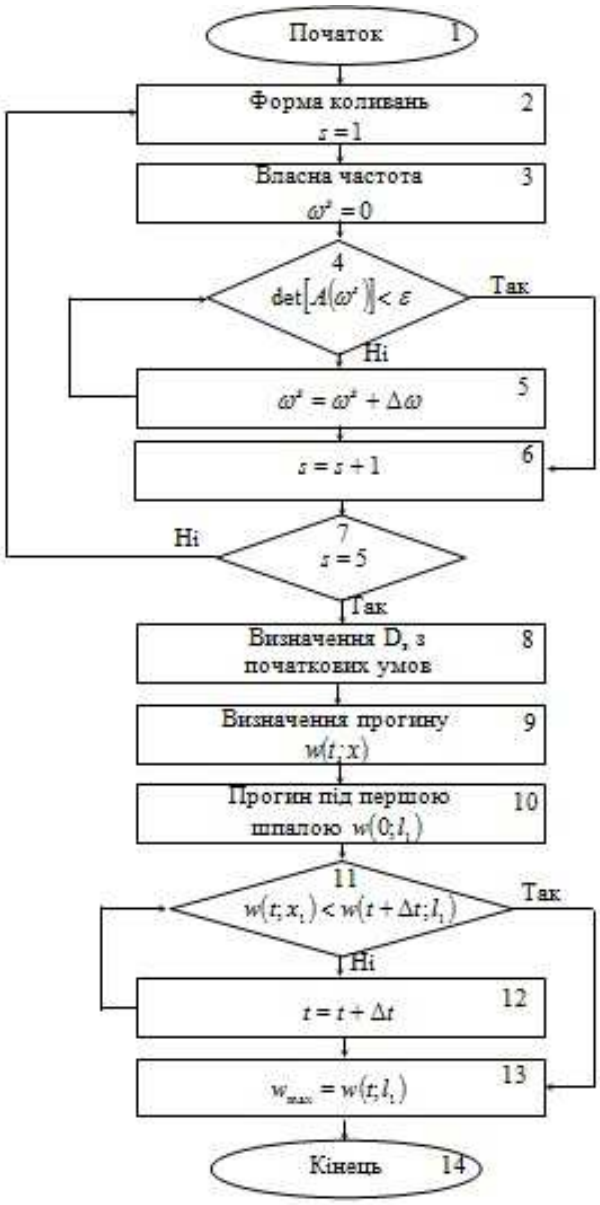

Рис. 3. Блок-схема розрахунку динамічних прогинів рейки

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Дослідження виконано при таких параметрах механічної системи "вагон–рейкова колія": c_1=4,225·10^5 Н/м; c_2=1·10^8 Н/м; m_1=1100 кг; V=[1÷15 м/с], m_2=[17000/8 (порожній вагон Т–3); 25050/8 (середнє завантаження вагона при 115 пасажирах); 30510/8 (максимальне завантаження вагона при 193 пасажирах)]. Характеристики двоголових накладок і рейки типу Р–65 відповідають таким даним [13]: для рейки довжина L=12,5 м; відстань між шпалами l=0,585 м; E=2,6·10^4 кН/см^2, J=3573 см^4, щільність ρ=7,8 кг/м^3; накладки - $E_н$=2·10^4 кН/см^2, $J_н$=766 см^4, $\rho_н$=7,8 кг/м^3. Результати розрахунків наведено на рис. 4, де $y_1=w(t, l_1)$.

Зміна завантаження вагона в діапазоні m_2=[2125÷3814] кг при швидкості руху V=15 м/с призводить до зміни прогину приймальної рейки під першою шпалою в діапазоні y_1=[4,255÷8,054] мм, тобто до його зростання в 1,89 разу.

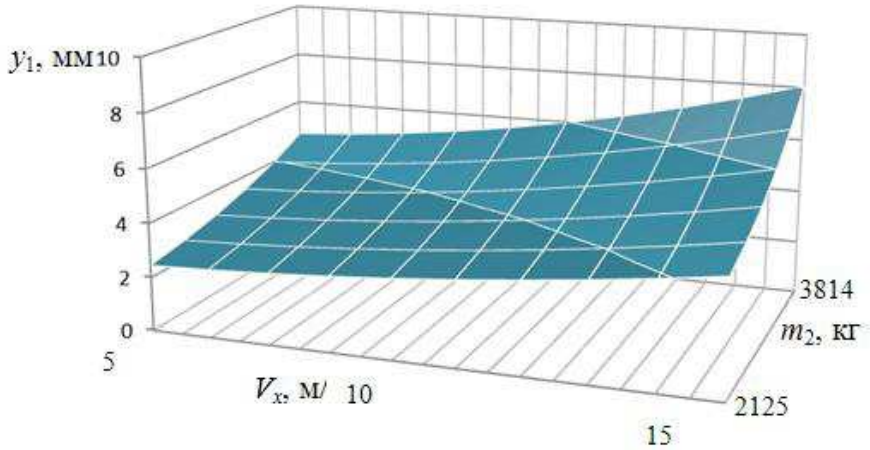

Рис. 4. Прогин приймальної рейки на четвертій фазі взаємодії

Встановлено, що збільшення швидкості руху вагона в діапазоні V=[1÷15] м/с і зведеної маси вагона m_2=[2125÷3814] кг призводить до зміни величини прогину приймальної рейки під першою шпалою в діапазоні y_1=[4,633÷8,054] мм, тобто до його зростання в 1,75 разу.

Практичне використання отриманих у роботі результатів полягає у вдосконаленні експлуатаційних режимів вагона трамваю, а також верхньої будови шляху.

Список використаних джерел

1. Шпачук, В. П. Стикова динаміка трамвая [Текст]: монографія / В. П. Шпачук, В. Х. Далека, А. В. Коваленко. – Харків: ХНАМГ, 2005.– 150 с.

2. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган; под ред. М. Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1986.– 559 с.

3. Вершинский, С.В. Динамика вагонов [Текст] / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.

4. Лазарян, В. А. Динамика вагонов. Устойчивость движения и колебания [Текст] / В.А. Лазарян. – М.: Транспорт, 1964. – 255 с.

5. Kuminek, T. A numerical analysis of the contact stress distribution and physical modelling of abrasive wear in the tram wheel-frog system [Text] / T. Kuminek, K. Aniołek, J. Młyńczak // An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear. – 2015. – Vol. 328. — P. 177–185.

6. Song, J.Numerical prediction of ground vibrations induced by high-speed trains including wheel–rail–soil coupled effects [Text] / J. Song, G. Chen, J. Yang // International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2015. – Vol. 77. – P. 274–278.

7. Коган, А. Я. Расчет динамики удара в элементах конструкции пути [Текст] / А. Я. Коган, Ю. Л. Пейч, И. В. Полещук // Проблемы путевого хозяйства Восточной Сибири: сб. науч. трудов. – Иркутск: Ир ГУПС, 2003. – С. 19-31.

8. Шпачук, В. П. Динамічна взаємодія трамвая з рейковою колією при проходженні стикової нерівності колії [Текст] / В. П. Шпачук, О. О. Чупринін, Т.О. Супрун // Комунальне господарство міст. – 2012. – №105. – С. 376-385.

9. Шпачук, В. П. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на статичні і динамічні прогини рейкової колії в зоні стикової нерівності [Текст] / В. П. Шпачук, О. О. Чупринін, Т. О. Супрун // Вібрації в техніці та технологіях. – 2014. – №4 (76). – С. 102-108.

10. Шпачук, В. П. Рівні статичної взаємодії трамвая з рейковою колією на четвертій фазі проходження вагоном стикової нерівності [Текст] / В. П. Шпачук, О. О. Чупринін, А. О. Гарбуз, Т. О. Супрун // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип: 162. – С. 11-20.

11. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле [Текст] / С. П. Тимошенко. - М.: Наука, 1967. – 444 с.

12. Бабаков, И. М. Теория колебаний [Текст] / И. М. Бабаков. – М.: Наука, 1968. – 691 с.

13. ДСТУ 18232-83. Рельсы контррельсовые. Технические условия. [Текст]. – Введ. 1985-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 13 с.

Шпачук Володимир Петрович, д-р техн. наук, професор кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел.: (096) 010-60-33.
Чупринін Олександр Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел.: (099) 053-89-42.
Супрун Тетяна Олександрівна, інженер кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел.: (093) 417-09-93.
E-mail: ms.suprun1989@mail.ru.
Гарбуз Алла Олегівна, канд. техн. наук, доцент кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел.: (050) 300-68-19.

Shpachuk Vladimir Prtrovich, Dr. Sc. science of theoretical and structural mechanics O. M. Beketov national university of urban economy in Kharkov. Tel.: (096) 010-60-33.
Chuprinin Aleksandr Alekseevich, PhD. Sc. Associate Professor of theoretical and structural mechanics O.M. Beketov national university of urban economy in Kharkov. Tel.: (099) 053-89-42.
Suprun Tatiana Aleksandrovna, engineer of theoretical and structural mechanics O. M. Beketov national university of urban economy in Kharkov. Tel.: (093) 417-09-93. E-mail: ms.suprun1989@mail.ru.
Garbuz Alla Olegovna, PhD. Sc. Associate Professor of theoretical and structural mechanics O. M. Beketov national university of urban economy in Kharkov. Tel.: (050) 300-68-19.

Стаття прийнята 26.10.2016 р.