

УДК 629.463.122

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ВАНТАЖУ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ В ІЗОТЕРМІЧНОМУ ВАГОНІ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Іщенко В.М., Брайковська Н.С., Осьмак В.Є.

RESEARCH TEMPERATURE CHANGE OF CARGO DURING TRANSPORTATION IN REFRIGERATOR CAR USING MATHEMATICAL MODELING

Ishchenko V., Braykovska N., Osmak V.

В статті розглянуто питання щодо математичного моделювання теплозахисних властивостей огороження кузова ізотермічного вагона. Вирішуючи різноманітні задачі пов'язані з експлуатацією ізотермічних вагонів, насамперед питання пов'язані зі зміною температури вантажу у вантажному приміщенні вагона за рахунок кількості теплоти, що надходить у вагон в літній період і кількості теплоти, що втрачається у зимовий період.

Ключові слова: ізотермічний вагон, теплоізоляція, математична модель, алгоритм, коефіцієнт теплопередачі, бінарні графіки.

Вступ. В сучасних умовах ринкової економіки з'явилась велика кількість відправників та вантажоотримувачів з невеликими об'ємами перевезень. Умови перевезення значної частини цих вантажів не вимагають при транспортуванні підтримання встановленого температурного режиму, а потребують лише захисту від атмосферного впливу та різких перепадів температур навколишнього середовища. В цьому випадку, перевагу мають одиночні ізотермічні вагони, які здатні забезпечити специфічні вимоги до умов зберігання більшої частини вантажів, що перевозяться залізницею. До таких вагонів належать криті вагони з теплоізоляцією. Сучасний парк критих вагонів з теплоізоляцією складається з вагонів термосів, вагонів з утепленим кузовом що переобладнані з рефрижераторних вагонів, а також заново збудованих критих вагонів з теплоізоляцією нового покоління.

Постановка проблеми. Відносна постійність температури в вантажному приміщенні критого вагона з теплоізоляцією досягається за рахунок теплозахисних властивостей огороження кузова вагона. Вирішуючи різноманітні задачі пов'язані з експлуатацією критих вагонів з теплоізоляцією, насамперед виникають питання зі зміною температури вантажу у вантажному приміщенні вагона за рахунок кіль-

кості теплоти, що надходить у вагон в літній період і втрачається у зимовий період.

Важливу роль в визначенні зміни температури вантажу при транспортуванні відіграє якість і ефективність оцінювання теплозахисних показників огороження кузова вагона в умовах експлуатації.

На теперішній час можливо говорити о цих або інших показниках і теплозахисних характеристиках вагона тільки на початковій стадії експлуатації після випуску з заводу-виробника. Це пояснюється тим, що новий рухомий склад підлягає ретельним випробуванням та дослідженням з визначення основних показників теплозахисних якостей вагона. Але вже після двох - трьох років експлуатації вагона в результаті дії динамічних та температурно - вологісних навантажень неможливо достатньо впевнено стверджувати про його показники і характеристики та теплозахисні властивості огороження кузова вагона. Ця науково-практичне завдання, ще більш ускладнюється після проходження деповського або капітального ремонту.

Для розв'язання питання пов'язаного зі зміною температури вантажу при транспортуванні доцільно в умовах вагоноремонтного підприємства за результатами випробувань складати теплотехнічний паспорт вагона який дозволяє в будь який час його експлуатації зробити висновок про теплозахисні властивості огороження кузова, рівень обмеження придатності, якість ремонту та визначити зміни температури вантажу на умови перевезення.

Мета статті. В статті представлено математичну модель теплотехнічної системи «навколишнє середовище – вантажне приміщення вагона – вантаж» яку доцільно використовувати для дослідження зміни температури вантажу та оцінки теплозахисних властивостей кузова вагона на умови перевезення.

Результати досліджень. Розроблена математична модель (ММ) з достатньою точністю описує

певні властивості об'єкта дослідження. В задачі, що розглядається об'єктом дослідження є теплотехнічна система «навколишнє середовище – вантажне приміщення вагона – вантаж» (НС – ВПВ – В). Для дослідження залежності зміни температури вантажу у вантажному приміщенні вагона від зміни температури навколишнього середовища в теплотехнічній системі «НС – ВПВ – В» використаємо аналітичний метод складання ММ. Цей метод ефективний на всіх стадіях розробки і єдиний можливий при дослідженні нової техніки.

Метод дає можливість без додаткових трудовитрат виявити вплив окремих факторів, встановити серед них найбільш вагомі і визначити можливості цілеспрямованого спрощення розрахунку. Така перевага метода складання ММ дає можливість отримання математичного описання дослідного об'єкта в широкому діапазоні зміни його параметрів.

Методика побудови ММ включає в себе наступні стадії:

- теоретичний аналіз процесів, що відбуваються в об'єкті;
- вибір процесів, на підставі попередніх досліджень які найбільш вагомо впливають на функціонування об'єкта;
- визначення параметрів, що характеризують кожен з процесів, вибраних в попередньому пункті, описання статистики і динаміки цих процесів;
- складання ММ в цілому для об'єкта, використовуючи опис процесів, що виділені.

За ієрархією рівнянь в даній задачі покладена аналогія поділу теплотехнічної системи на окремі елементи. Найвищим рівнем є розв'язок в цілому за теплотехнічною системою «НС – ВПВ – В». Наступні рівні – огороження кузова і вантажу, за котрими в теперішній час накопичено достатня кількість конкретних рішень.

Структура теплотехнічної системи «НС – ВПВ – В» зображена на рисунку 1.

ММ об'єкта представляє сукупність математичного описання структури системи, систему балансових рівнянь елементів системи, систему обмежень на параметри і функції цілі.

Вирішуючи різноманітні задачі пов'язані з експлуатацією ІВ, насамперед виникають питання пов'язані зі зміною температури вантажу у вантажному приміщенні вагона за рахунок кількості теплоти, що надходить у вагон в літній період і кількості теплоти, що втрачається у зимовий період [1].

Критеріями ефективності даної системи буде слугувати [2, 3]:

- площа поверхні теплопередачі кузова вагона, $(H) \text{ м}^2$;
- істинний коефіцієнт теплопередачі огороження кузова, $(\bar{K}) \text{ Вт/м}^2\text{К}$;
- площа еквівалентного отвору фільтрації, $(F_{\text{ек}}) \text{ м}^2$;
- тепловий еквівалент вантажу, $(W_{\text{ем}}) \text{ Дж/К}$;
- температура навколишнього середовища, $(\theta_{\text{нс}}) \text{ К}$;

- температура вантажу, $(\theta_{\text{в}}) \text{ К}$.

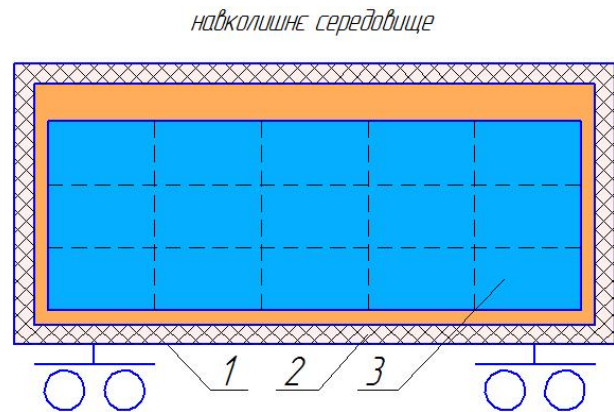


Рис.1. Структурна схема теплотехнічної системи «навколишнє середовище – вантажне приміщення вагона – вантаж»
1 – огороження кузова; 2 – теплоізоляція; 3 – вантаж

Якщо всю поверхню огороження кузова поділити на n теплопровідних ділянок, то основне рівняння теплообміну між атмосферним повітрям з вантажем і повітрям у вантажному приміщенні вагона можливо записати у наступному вигляді [4]:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (1)$$

де Q - сумарна кількість теплоти, Вт;

Q_i - кількість теплоти, що передається на i -ої ділянці, Вт.

Для випадку перевезень вантажу у літній період, теплота від навколишнього середовища проникає у вантажне приміщення в результаті дії процесів теплопередачі крізь огороження кузова внаслідок наявності різниці температур зовнішнього повітря і повітря в середині приміщення вагона, внаслідок повітрообміну крізь нещільності вантажного приміщення і поглинання зовнішньою поверхнею огороження теплоти сонячної радіації.

В якості основного математичного описання структури системи використовуємо рівняння теплового балансу:

$$Q_{\text{сум}} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (2)$$

де $Q_{\text{сум}}$ - сумарна кількість теплоти, Вт;

Q_1 - кількість теплоти, що передається крізь огороження кузова в наслідок наявності різниці температур зовнішнього повітря і повітря в середині вантажного приміщення, Вт;

Q_2 - кількість теплоти, що проникає у вантажне приміщення вагона в наслідок повітрообміну крізь нещільності вантажного приміщення, Вт;

Q_3 - кількість теплоти, що поглинається зовнішньою поверхнею огороження від дії сонячної радіації, Вт [5].

Складаємо систему балансових рівнянь елементів системи:

$$\begin{cases} Q_1 = \bar{K} \cdot S \cdot (\theta_3 - \theta_6) \\ Q_2 = F_{ек} \cdot \rho \cdot C (\theta_3 - \theta_6) \cdot \sqrt{2C \cdot (\theta_3 - \theta_6)}, \\ Q_3 = \bar{K} \cdot S \cdot \Delta\theta_{ек} \end{cases} \quad (3)$$

де \bar{K} - істинний коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²К;

S - площа поверхні огороження кузова вагона, м²;

θ_3 - зовнішня температура повітря, К;

θ_6 - температура повітря в середині приміщення, К;

$F_{ек}$ - площа еквівалентного отвору фільтрації, м²;

ρ - щільність повітря, кг/м³;

C - теплоємність повітря, Дж/кг К;

$\Delta\theta_{ек}$ - умовне еквівалентне підвищення температури зовнішнього повітря за рахунок дії сонячної радіації, град [5].

Введемо наступні функціональні зв'язки елементів системи:

$$\begin{cases} Q_1 = f(\bar{K}, S, \theta_3, \theta_6) \\ Q_2 = f(F_{ек}, C, \rho, \theta_3, \theta_6), \\ Q_3 = f(\bar{K}, S, \Delta\theta_{ек}) \end{cases} \quad (4)$$

Тоді сумарна кількість теплоти, що потрапляє у вантажне приміщення вагона залежить від значення наступних параметрів:

$$Q = f(\bar{K}, S, F_{ек}, C, \rho, \Delta\theta_{ек}, \theta_3, \theta_6), \quad (5)$$

Зміна температури вантажу, що перевозиться у вантажному приміщенні вагона зі зміною температури атмосферного повітря, визначається залежністю:

$$Q_{сум} = W_{вт} \cdot \Delta t \cdot \tau^{-1}, \quad (6)$$

де $W_{вт}$ - тепловий еквівалент вантажу, Дж/кг;

Δt - зміна температури вантажу, К;

τ - тривалість дії кількості теплоти, с.

Обмеження відображені у вигляді нерівностей сукупності параметрів [4]

$$\begin{aligned} \theta_3^{\min} \leq \theta_3 \leq \theta_3^{\max}, \quad W_{вт}^{\min} \leq W_{вт} \leq W_{вт}^{\max}, \\ \Delta t^{\min} \leq \Delta t \leq \Delta t^{\max}. \end{aligned}$$

Для випадку перевезення вантажу в зимовий період кількість теплоти, що втрачається з вагона, визначається дією процесів теплопередачі крізь огороження кузова внаслідок наявності різниці температур повітря всередині вантажного приміщення вагона і зовнішнього повітря та повітрообміном крізь нещільності кузова [6, 7]. Для визначення сумарної кількості теплоти, що втрачається із вагона в зимо-

вий період, використовуємо рівняння щодо визначення кількості теплоти, яка проникає у вантажне приміщення в літній період з врахуванням зміни напрямлення потоку теплоти. Зміна температури вантажу у вантажному приміщенні визначається за формулою (6).

На підставі отриманої ММ розроблений узагальнений алгоритм зміни температури вантажу при транспортуванні в ІВ в залежності від зміни температури атмосферного повітря і теплового еквіваленту вантажу.

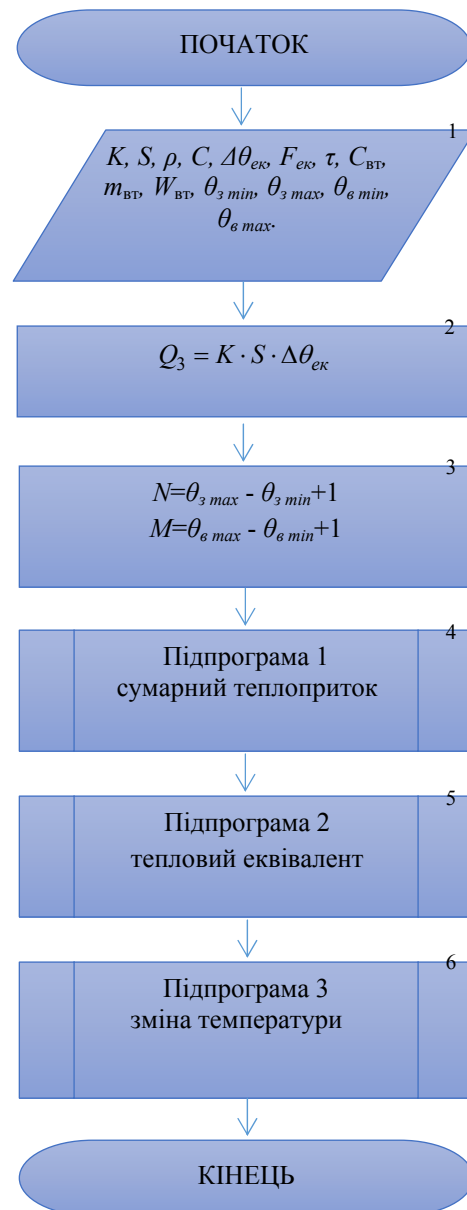


Рис. 2. Узагальнений алгоритм математичної моделі зміни температури вантажу при його транспортуванні

На підставі отриманої ММ та узагальненого алгоритму який наданий на рисунку 3 і реалізований засобами MS Excel, побудовані допоміжні графічні залежності зміни температури вантажу від умов транспортування в ІВ [8, 9, 10].

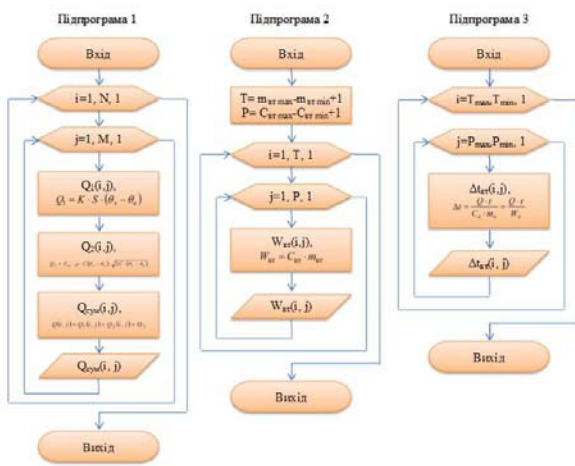


Рис. 3. Алгоритми підпрограм загального алгоритму математичної моделі зміни температури вантажу при його транспортуванні

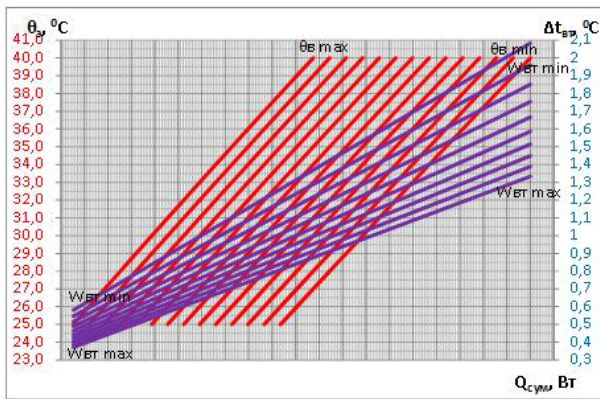


Рис. 4. Бінарні графічні зміни температури вантажу при перевезенні у літній період

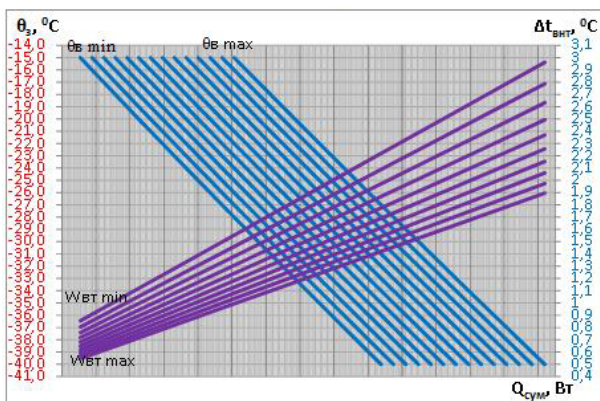


Рис. 5. Бінарні графічні зміни температури вантажу при перевезенні у зимовий період

Побудовані графічні залежності зміни температури вантажу при транспортуванні дозволяють прогнозувати теплотехнічний рівень захисту кузова вагона на умови транспортування вантажу та раціонально використовувати вагони в експлуатації згідно їх теплотехнічних якостей.

Висновок. Розроблена та представлена в статті математична модель є адекватною та ефективною. Для її чисельної реалізації обґрунтовано вибір графічних залежностей зміни температури вантажу при перевезенні в критичних вагонах з теплоізоляцією у літній та зимовий періоди; складено алгоритми обробки дослідних даних для умов перевезення вантажу; розроблені алгоритми реалізовані у створеному програмному комплексі для побудови бінарних графічних залежностей.

Література

1. Бартош Е.Т. Энергетика изотермического подвижного состава / Е.Т. Бартош –М.: Транспорт, 1976. 304 с.
2. Osmak, V. Classification isothermal rolling stock with the main criteria thermal properties fence body [Text] / V. Osmak / Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2015, No. 3 – P.265-267.
3. Ворон О.А. Аспекты совершенствования железнодорожных перевозок скоропортящихся грузов в составе непрерывной холодильной цепи / О.А. Ворон, И.Г. Морчиладзе // Транспорт РФ, 2014, №1 С. 40-45.
4. Іщенко, В.М. Теплотехнічна модель конструкції огороження кузова критого вагона з теплоізоляцією / Іщенко В.М., Фомін О.В., Осьмак В.Є. // Збірник наукових праць Українського Державного університету залізничного транспорту Випуск 157, Харків 2015. Стр.143-148.
5. Показатели теплоотдачи кузовов пассажирских вагонов. Die Wannedurchgangszahl von Reisezugvagenkasten / Opel G. // Eisenbahningenieur МФИШ.-1999, 50, № 10, 21.- РЖ ВИНТИ 2000 № 2 11В.66.
6. Китаев Б.Н. Тепловое воздействие солнечной радиации на вагоны / Б.Н. Китаев. - М.:Трансжелдориздат, 1962, 32 с.
7. Попырин Л.С. Исследование систем теплоснабжения / Л.С. Попырин, К.С. Светлов, Г.М. Беляева и др. - М.: Наука, 1989. - 215с.
8. Фомін О.В. Теоретичні основи програмного комплексу визначення та використання математичних моделей складових вантажних вагонів // Науковий журнал "Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, No. 6, 2013. pp. 87 - 91.
9. ДЧ-479. Инструкция по обслуживанию перевозок скоропортящихся грузов в рефрижераторных вагонах в международном сообщении между государствами - участниками Содружества, Латвийской Респ. 2006
10. Jamili, A.A Mathematical Model for Train Routing and Scheduling Problem with Fuzzy Approach [Text] / A. Jamili // Proceedins of the 2012 International Conference on Sndustrial Engineering and Operations Menegment Istanbul. – Turkey, july 3 – 6? 2012. –P. 90-99.

References

1. Bartosh E.T. Jenergetika izotermicheskogo podvizhnogo sostava / E.T. Bartosh –M.: Transport, 1976. 304 s.
2. Osmak, V. Classification isothermal rolling stock with the main criteria thermal properties fence body [Text] / V. Osmak / Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2015, No. 3 – P.265-267.
3. Voron O.A. Aspekty sovershenstvovaniya zheleznodorozhnyh perevozok skorportjashhihsja грузов v sostave nepreryvnoj holodil'noj cepi / O.A. Voron, I.G. Morchiladze // Transport RF, 2014, №1 S. 40-45.

4. Ishhenko, V.M. Teplotehnichna model' konstrukcii ogorodzhennja kuzova kritogo vagona z teploizoljacieju / Ishhenko V.M., Fomin O.V., Os'mak V.Є. // Zbirnik naukovih prac' Ukraїns'kogo Derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transportu Vipusk 157, Harkiv 2015. Str.143-148.
5. Pokazateli teplootdachi kuzovov passazhirskih vagonov. Die Wannendurchgangszahl von Reisezugvagenkasten / Opel G. // Eisenbahningenieur MFISh.-1999, 50, № 10, 21.- RZh VINITI 2000 № 2 11V.66.
6. Kitaev B.N. Teplovoe vozdejstvie solnečnoj radiacii na vagony / B.N. Kitaev. M.:Tranzheldorizdat, 1962, 32s.
7. Popyrin L.S. Issledovanie sistem teplosnabzhenija / J.I.C. Popyrin, K.S. Svetlov, G.M. Beljaeva i dr. M.: Nauka, 1989. 215s.
8. Fomin O.V. Teoretichni osnovi programnogo kompleksu viznachennja ta vikoristannja matematichnih modelej skladovih vantazhnih vagoniv // Naukovij zhurnal "Visnik Kremenčuc'kogo nacional'nogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo, No. 6, 2013. pp. 87 - 91.
9. DCh-479. Instrukcija po obsluzhivaniju perevozok skoroportjashhihsja gruzov v refrizheratornih vagonah v mezhdunarodnom soobshhenii mezhdru gosudarstvami - uchastnikami Sodruzhestva, Latvijskoj Resp. 2006.
10. Jamili, A.A Mathematical Model for Train Routing and Scheduling Problem with Fuzzy Approach [Text] / A. Jamili // Proceedins of the 2012 International Conference on Sndustrial Engineering and Operations Menegment Istanbul. – Turkey, July 3 – 6? 2012. –P. 90-99.

Ищенко В.Н., Брайковская Н.С., Осьмак В.Е., Исследование изменения температуры груза при транспортировке в изотермических вагонах с использованием математического моделирования.

В статье рассмотрены вопросы математического моделирования теплозащитных свойств ограждения кузова изотермического вагона. Решая различные задачи связанные с эксплуатацией изотермических вагонов, прежде всего вопросы, связанные с изменением температуры груза в грузовом помещении вагона за счет количества теплоты, поступающей в вагон в летний период и количества теплоты, которое теряется в зимний период.

Ключевые слова: изотермический вагон, теплоизоляция, математическая модель, алгоритм, коэффициент теплопередачи, бинарные зависимости.

Ishchenko V., Braikovskaya N., Osmak V. Investigation of the change in cargo temperature during transportation in insulated wagons using mathematical modeling.

In the article the question of mathematical modeling of heat-shielding properties protections Isothermal car. Solving the problem associated with the temperature of goods during transportation appropriate in terms of car-repair business for test results to make Thermotechnical passport that allows the car at any time of its operation to conclude shielding properties fence body of restricting availability, quality repairs and determine the temperature change of cargo the conditions of carriage.

Based on the performance and characteristics of heat passport for research and evaluation of thermal barrier properties of the car body, the mathematical model of heating system "environment - cargo space of the wagon - load", which with sufficient accuracy describes the thermal properties of the car body and cargo on traffic conditions. For a mathematical model used analytical method suitable for all stages of development and operation of means. This method enables relatively easy to identify the effect of individual factors on thermo system in question, set among them the most important and identify opportunities for targeted simplify the calculation and construction of thermal characteristics. This preferred method a mathematical model makes it possible to obtain mathematical description of heating system in a wide range of parameters.

Keywords: refrigerator car, insulation, mathematical model, algorithm, heat transfer coefficient, binary dependencies.

Ищенко В.М. – к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного економіко-технологічного університету транспорту.

Брайковська Н.С. – к.т.н., професор, в.о. ректора Державного економіко-технологічного університету транспорту.

Осьмак В.Є. – к.т.н., старший викладач кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного економіко-технологічного університету транспорту, e-mail: vic5@ukr.net

Рецензент: д.т.н., проф. **Горбунов М.І.**

Стаття подана 17.05.2017