

УДК 629.4.048.7

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РУХОМОГО  
СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ**

Асп. Е. В. Білошицький (ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна)

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВИЖНОГО  
СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Асп. Э. В. Белошицкий (ДНУЖТ имени академика В. Лазаряна)

**ENERGY EFFICIENCY OF LIFE PROTECTION OF SYSTEMS FOR RAILWAY  
VEHICLES**

Postgraduate student E. V. Biloshytskyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.179.2018.147709>

---

---

*Досліджено способи поліпшення техніко-економічних параметрів систем життєзабезпечення рухомого складу. Встановлено, що при проектуванні пасажирських вагонів конструкторами не враховується низка чинників, які впливають на енергоефективність систем життєзабезпечення пасажирських вагонів. Визначено шляхи підвищення енергоефективності систем опалення пасажирських вагонів. Проведене*

дослідження дає підстави для зниження потужності системи опалення щонайменше на 10 % – це сприятиме зниженню металоемності системи опалення і, як наслідок, зниженню тари вагона.

**Ключові слова:** експериментальні виміри, математичне моделювання, пасажирський вагон, теплові процеси, система опалення.

*Исследованы способы улучшения технико-экономических параметров систем жизнеобеспечения подвижного состава. Установлено, что при проектировании пассажирских вагонов конструкторами не учитывается ряд факторов, влияющих на энергоэффективность систем жизнеобеспечения пассажирских вагонов. Определены пути повышения энергоэффективности систем отопления пассажирских вагонов. Проведенное исследование дает основания для снижения мощности системы отопления как минимум на 10 % – это приведет к снижению металлоемкости системы отопления и, как следствие, снижению тары вагона.*

**Ключевые слова:** экспериментальные измерения, математическое моделирование, пассажирский вагон, тепловые процессы, система отопления.

*Passenger cars consume a fairly significant share of electricity to create comfortable conditions, when transporting passengers. The conducted studies of energy efficiency improvement taking into account the results of mathematical modeling of thermal processes it was established that during the design of passenger cars designers do not take into account a number of factors, affecting energy efficiency life support systems for passenger cars. In the calculations of the thermal balance of the car only heat is taken into account, supplied by heating pipes for more accurate calculations thermal balance of a passenger car the given heat must be taken into account in the thermal balance of the car. Experimental measurements confirmed presence zones of temperature fields with different temperature modes, separated by a decorative ceiling in which the zone of constructive ceiling cavity overheats over the normative indicators. This leads to increased heat loss through the roof of the carriage. In particular, it has been established that the proposed modernization on increasing the energy efficiency of the heating system can be implemented at relatively low cost, in the conditions of existing carriages depot, which will reduce energy consumption for heating 13.4% or UAH 25.9 million for a year. Improved mathematical model non-stationary thermal regime of a passenger car allows comprehensive analysis thermal processes of a passenger car, taking into account its constructive changes by mathematical experiment. Thus, this study will allow not only to increase energy efficiency but also provides grounds for reducing the power of the heating system by at least 10%, which will reduce the metal content of the heating system and, as a consequence of the reduction of the wagon's packaging, reduction of power of electric devices, wires, and the number of electrically heated TENs will decrease.*

**Keywords:** experimental measurements, mathematical modeling, passenger car, thermal processes, heating system.

**Вступ.** Основний вид послуг залізничного транспорту – це послуги з перевезення. Залізничні перевезення є менш енергоємними порівняно з автомобільним транспортом, цим і пояснюється їхня домінуюча роль у транспортній системі. Енергозбереження – один з ключових чинників підвищення рентабельності

залізничного транспорту. Встановлено два основні цільові показники енергозбереження: зниження енергоємності виробничої діяльності та підвищення енергоефективності виробничої діяльності.

Пасажирські перевезення, як один з основних видів діяльності магістрального залізничного транспорту, забезпечують

комфортні умови при перевезенні пасажирів, що є необхідною вимогою до пасажирського рухомого складу. Пасажирські вагони споживають значну частку електроенергії для створення параметрів комфортних умов при перевезенні пасажирів. Орієнтовно 20–40 % загальновитраченої електроенергії під час перевезення пасажирів використовується для опалення, вентиляції та кондиціонування повітря [1–2]. Тому вдосконалення параметрів енергоефективності систем життєзабезпечення рухомого складу залізниць являє собою актуальне науково-прикладне завдання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільш поширеним типом водяної системи опалення пасажирських вагонів є система з верхнім розведенням труб, яка розрахована на природну циркуляцію води. Конструкція таких систем передбачає, що розвідні труби системи опалення знаходяться під дахом у конструкціях, які знизу закриті декоративною стелею. Хоча конструктивно й передбачена теплоізоляція цих труб, але, як показують теоретичні дослідження [3], при циркуляції теплоносія через ці труби певна кількість тепла передається у вагон.

Аналіз існуючих математичних моделей теплового балансу «система опалення – пасажирський вагон» показує, що в моделях враховуються тільки потужності приладів систем життєзабезпечення, які безпосередньо призначені для формування мікроклімату в приміщеннях пасажирських вагонів [4–7]. Але для розрахунку швидкості природної циркуляції теплоносія в системі опалення різницю температур теплоносія на вході і виході розвідних труб рекомендують приймати  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [7–10]. Теплові витрати розвідними трубами і їхній вплив на мікроклімат у вагоні в розрахунках теплового балансу пасажирського вагона не враховуються [11, 12]. У розрахунках теплового балансу вагона враховується

тільки тепло, що віддається обігрівальними трубами. Для більш точних розрахунків теплового балансу пасажирського вагона віддане тепло потрібно враховувати в математичній моделі теплового балансу вагона. Тепло, яке віддається розвідними трубами, краще враховувати окремо, незалежно від тепла обігрівальних труб, тому що розвідні труби розташовані біля даху вагона і закриті декоративною стелею, таким чином, тепло, що віддається розвідними трубами, лише догріває повітря і конструкції, які розташовані біля даху вагона та декоративною стелею, і лише незначна частина цього тепла впливає на мікроклімат пасажирського вагона.

**Визначення цілей і завдання дослідження.** Метою проведених досліджень є визначення можливостей підвищення показників енергоефективності пасажирських вагонів, тобто зменшення споживання енергії системами життєзабезпечення.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- удосконалення математичних моделей теплового балансу пасажирських вагонів;
- проведення експериментальних вимірювань для визначення місць теплових витрат у вагонах з різними конструкціями систем опалення;
- оцінювання економічного ефекту запропонованого методу вдосконалення систем опалення, який ґрунтується на математичній моделі.

**Основна частина дослідження.** Для комплексного аналізу теплового режиму у приміщенні вагона застосовується рівняння для розрахунку нагрівання і охолодження температури повітря в приміщенні вагона від заданої початкової температури  $t(0)$  до деякої кінцевої температури  $t_n$ , нагрівання і охолодження теплоносія в системі опалення від заданої початкової температури  $t_k(0)$  до деякої кінцевої температури  $t_k$  за короткий проміжок часу  $\tau$ , які мають вигляд [13]

$$t_n(\tau) = t(0) + \frac{(Q_{mp} + Q_n + Q_l) - (Q_{вит} + Q_{інф})}{C_{ваг}} \tau, \quad (1)$$

$$t_k(\tau) = t(0) + \frac{Q_{ТЕН} - (Q_{mp} + Q_{кл})}{C_{он}} \tau. \quad (2)$$

Для більш точних розрахунків теплового балансу пасажирського вагона автором пропонується рівняння (1) і (2) доповнити величиною  $Q_{mp}^{розв}$  – тепло

розвідних труб, а рівняння (1) ще й величиною  $Q_{вит}^{\partial ax}$  – додаткові тепловтрати даху вагона, тоді рівняння набувають такого вигляду:

$$t_n(\tau) = t(0) + \frac{(Q_{mp} + Q_{mp}^{розв} + Q_n + Q_l) - (Q_{вит} + Q_{вит}^{\partial ax} + Q_{інф})}{C_{ваг}} \tau, \quad (3)$$

$$t_k(\tau) = t(0) + \frac{Q_{ТЕН} - (Q_{mp} + Q_{mp}^{розв} + Q_{кл})}{C_{он}} \tau, \quad (4)$$

де  $Q_{mp}$  – тепло, що віддається обігрівальними трубами;  $Q_{mp}^{розв}$  – тепло, що віддається розвідними трубами;  $Q_n$  – тепло, що вноситься підігрітим повітрям;  $Q_l$  – тепловідлення від пасажирів;  $Q_{вит}$  – тепло, що втрачається через огорожувальні конструкції, у тому числі й вікна;  $Q_{інф}$  – тепло, що витрачається на нагрівання холодного повітря, яке проникає через нещільність кузова;  $C_{ваг}$  – сумарна теплоємність усіх внутрішніх перегородок, дерев'яної обшивки зовнішніх огорожень вагона і половини теплоємності теплозахисного шару;  $Q_{ТЕН}$  – тепловий потік, що виділяється нагрівальними ТЕНами,  $C_{он}$  – теплоємність теплоносія і металеві конструкції системи опалення;  $Q_{кл}$  – тепло, що витрачається теплоносієм на підігрів зовнішнього повітря.

Як видно з формули (3), температура повітря в приміщенні пасажирського вагона складається з тепла, що віддано всіма трубами системи опалення, а до загальних

тепловтрат додаються додаткові тепловтрати через дах вагона. З формули (4) температури теплоносія в котлі до витрат тепла теплоносієм додалися витрати тепла розвідними трубами. Таким чином можна визначати температуру окремих зон у вагоні, виділяючи температурні поля, у яких розташовано додаткове джерело тепла.

Складові  $Q_{mp}^{розв}$ ,  $Q_{вит}^{\partial ax}$  визначаються виразами

$$Q_{вит}^{\partial ax} = F_{\partial ax} \cdot k_3 (t_n^{\partial ax} - t_n), \quad (5)$$

де  $F_{\partial ax}$  – площа даху вагона;  $t_n^{\partial ax}$  – температура повітря і конструкцій, які розташовані біля даху вагона під декоративною стелею;

$$Q_{mp}^{розв} = c_w \cdot G_w \cdot \Delta t_{mp}^{розв} \cdot k_{вит}^{\partial ax}, \quad (6)$$

де  $\Delta t_{mp}^{розв}$  – різниця температур на вході і виході теплоносія з розвідних труб;  $k_{вит}^{\partial ax}$  – коефіцієнт втрат тепла, яке віддається

розвідними трубами і не впливає на мікроклімат вагона,  $k_{вит}^{дах}$  у подальших розрахунках буде прийматися як 2/3, оскільки на мікроклімат у вагоні впливає температура декоративної стелі та тепловий підпір повітря в салоні вагона.

Температуру конструкцій, які розташовані біля даху вагона під декоративною стелею, можна визначити за формулою

$$t_n^{дах} = \frac{Q_{тр}^{розв} - Q_{вит}^{дах}}{C_{дах}} \cdot \tau, \quad (7)$$

де  $C_{дах}$  – сума теплоємності повітря і конструкцій, які розташовані між дахом вагона і декоративною стелею, і половини об'єму теплоізоляції даху вагона.

Як показали теоретичні дослідження, при циркуляції теплоносія через розвідні труби певна кількість тепла передається у приміщення вагона. На практиці тепло, яке віддається розвідними трубами, нагріває повітря і конструкції між дахом і декоративною стелею вагона. Як відомо, вільний (природний) рух повітря виникає під дією теплообміну біля поверхні унаслідок різниці щільності шарів повітря, що мають різну температуру: менш нагріті шари повітря витісняються вгору більш важкими холодними шарами. Тобто нагріте під дахом повітря тепліше за повітря в салоні вагона і не може впливати на мікроклімат у пасажирському вагоні. Як наслідок, зростають тепловтрати через дах пасажирського вагона.

Навесні 2018 року на базі пасажирських вагонів пасажирського вагонного депо Львів ПКВЧД-8 автором були проведені експериментальні вимірювання температурних полів повітря, зокрема опалювальних приладів у пасажирських вагонах.

Метою експериментальних вимірювань було визначення місць теплових витрат у вагонах з різними конструкціями систем опалення для

вдосконалення моделей теплового балансу пасажирських вагонів з подальшим коригуванням елементів конструкції і підвищенням якості функціонування систем опалення. Вимірювання проводились тепловізором «Testo 875-1» заводський номер 1991253. Діапазон вимірювання від -20 до +100 °С; абсолютна похибка вимірювань становить  $\pm 2\%$  вимірюваного значення.

Експериментальні вимірювання включали в себе вимірювання температури опалювальних приладів і внутрішнього обладнання вагона: визначали температуру на виході з водогрійного котла, температуру розвідних труб посередині і в кінці вагона в точці, де розвідні труби приєднуються до стояків, температуру внутрішніх перегородок і декоративної стелі. Вимірювання проводилися в 5 купейних і 5 плацкартних вагонах, результати вимірювань зведені в табл. 1. Теплограми вимірювань окремих вагонів представлені на рис. 1 і 2.

Як видно з теплограм на рис. 1, 2, температура теплоносія в розвідних трубах знижується, нагріваючи повітря між декоративною стелею та дахом вагона, а також елементи конструкції під декоративною стелею, що сприяє додатковим тепловтратам через дах вагона. З порівняння теплограм перегородки і декоративної стелі видно, що декоративна стеля має вищу температуру, ніж перегородки, отже декоративна стеля віддає частину тепла, отриманого від розвідних труб, а тепле повітря під декоративною стелею створює тепловий підпір повітря.

Як видно з даних, наведених у табл. 1, температура теплоносія в розвідних трубах знижується в купейному вагоні в середньому на 3,7° С, у плацкартному вагоні на 5,9° С. Це пояснюється тим, що системи опалення купейних і плацкартних вагонів конструктивно відрізняється розташуванням розвідних труб: у купейних вагонах ці труби проходять одна біля одної

під стелею проходу, а в плацкартному – по обидва боки бокових стінок, вище багажних полиць, тому в плацкартних

вагонах розвідні труби віддають більше тепла (рис. 3).

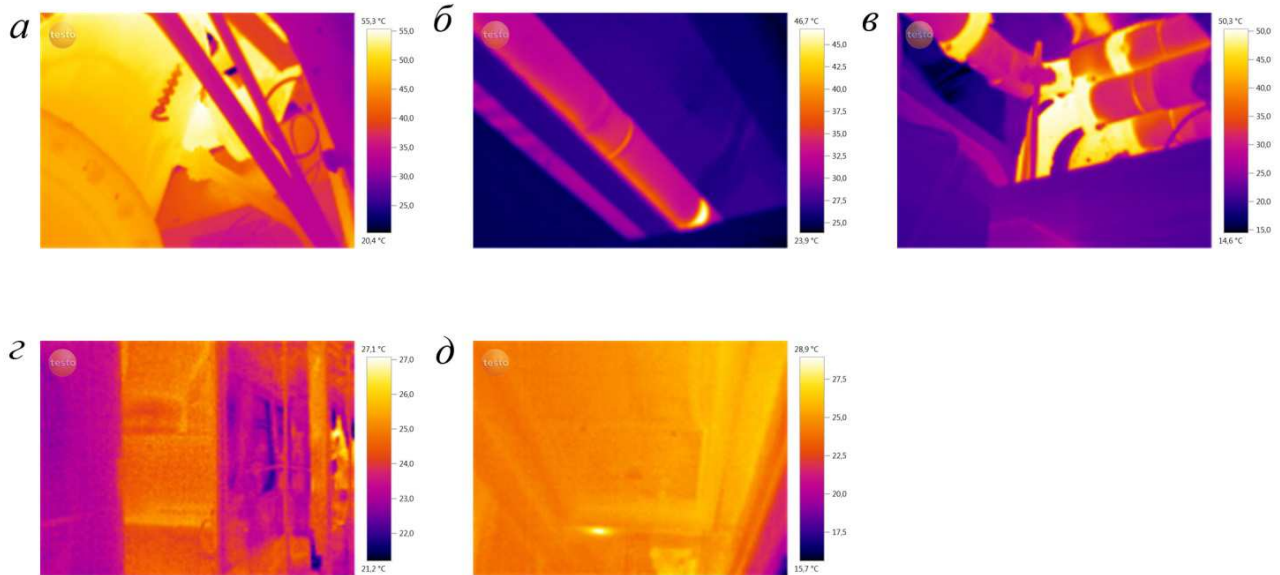


Рис. 1. Теплограми вимірювань купейного вагона (заводський номер 035-14221):  
*а* – котел; *б* – розвідна труба, посередині вагона; *в* – стояк у верхній частині;  
*г* – перегородки; *д* – декоративна стеля

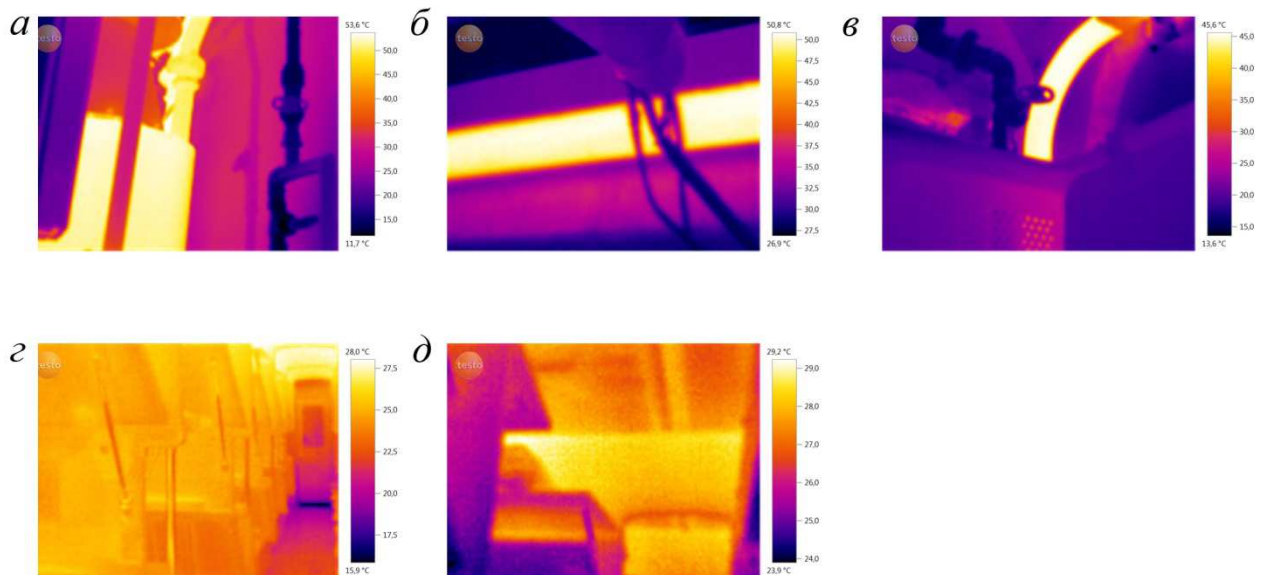


Рис. 2. Теплограми вимірювань плацкартного вагона (заводський номер 036-21026):  
*а* – котел; *б* – розвідна труба, посередині вагона; *в* – стояк у верхній частині;  
*г* – перегородки; *д* – декоративна стеля

Результати вимірювань температури опалювальних приладів і внутрішнього обладнання вагона

Номер вагона	Температура, °С				
	на виході з котла	розвідної труби	зверху стояка	перегородок	декоративної стелі
035-10732	40,0	39,0	39,0	20,0	22,4
035-14221	55,3	46,7*	50,3	25,6	28,9
035-14437	51,7	49,1	46,5	22,5	24,6
035-16424	51,3	49,2	47,3	21,5	22,9
035-16705	48,4	32,9*	45,1	21,4	24,6
03620356	40,6	31,2*	35,8	24,4	28,3
036-20358	37,7	34,5	33,2	21,7	24,5
036-20481	36,8	35,3	33,5	25,2	27,3
036-20853	52,6	37,7	33,6	25,3	27,2
036-21026	53,6	50,8	45,6	24,4	28,4

Примітка. \* – температура теплоізоляції розвідних труб.

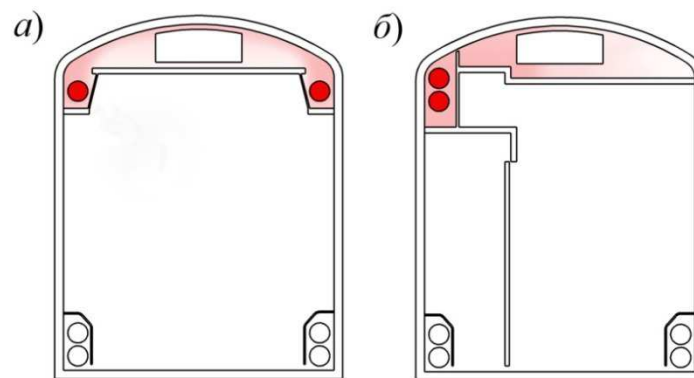


Рис. 3. Зони температурних полів конструкцій під декоративною стелею плацкартного (а) та купейного (б) вагонів

Таким чином, у кузові пасажирського вагона можна виділити дві зони температурних полів з різними температурними режимами, які розділені декоративною стелею. Перша зона – це приміщення вагона, включаючи службові і санітарно-гігієнічні відсіки, які обігріваються обігрівальними трубами, друга – конструкції між дахом і декоративною стелею, які догріваються і перегріваються понад нормативні показники розвідними трубами. Зони

температурних полів конструкцій під декоративною стелею купейного і плацкартного вагона відрізняються й за конструкціями систем опалення, про які згадувалося вище, це схематично показано на рис. 3 (а – у плацкартному, б – у купейному вагоні). Як ілюструють схеми рис. 3, у купейному вагоні зона температурних полів конструкцій під декоративною стелею знаходиться з одного боку вагона, а саме там, де проходять обігрівальні труби, вона фактично нагріває

конструкції до повітропроводу, тобто нагрівання доходить до середини даху вагона. У плацкартному вагоні ця зона розташована по обидва боки вагона і таким чином нагріває конструкції з обох боків майже повністю, унаслідок чого в плацкартних вагонах температура теплоносія в розвідних трубах знижується в середньому на 60 % більше, ніж у купейних вагонах.

З урахуванням абсолютної похибки вимірювання приладу, яка складає 2 % вимірюваної температури, у температурному еквіваленті похибка становить  $0,9^{\circ}\text{C}$ , таким чином, результати теоретичних досліджень, викладених вище, повністю підтверджуються експериментальними вимірюваннями.

З метою підвищення енергоефективності систем водяного опалення для ліквідації або зниження втрат тепла автором пропонується заміна розвідних труб однією трубою, але з більшим діаметром, таким чином, щоб площа поперечного перерізу труби дорівнювала площі поперечного перерізу двох труб з меншим діаметром. Встановлення однієї розвідної труби більшого діаметра дозволить зменшити на 35 % теплопередавальну поверхню і, як наслідок, знизяться втрати напору на тертя. Для

зменшення тепловтрат розвідною трубою розташовувати її потрібно в коробі такої конструкції, щоб максимально знизити конвективний теплообмін, і з застосуванням комбінованого утеплювача, який, крім базової основи з низькою теплопровідністю, має віддзеркалюючий шар з тонкої полірованої алюмінієвої фольги. При цьому утеплюється не тільки розвідна труба, а й стінки короба з внутрішнього боку, де проходить труба. Як показують розрахунки, це дозволить знизити тепловіддачу розвідної труби приблизно до 75 %.

Для оцінювання економічного ефекту запропонованого методу вдосконалення систем опалення, ґрунтуючись на описану вище математичну модель, була змодельована робота системи опалення без змін і з урахуванням запропонованих змін.

Розрахунки проводилися для середньої температури зовнішнього повітря в опалювальний період по Україні за будівельними нормами і правилами. Було використано водяну опалювальну систему з природною циркуляцією і дискретним двоступінчастим підведенням тепла великої потужності (2 групи по 24 кВт).

Розміри та фізичні параметри елементів, що були використані для розрахунків:

Площа кузова, $\text{м}^2$ .....	330
Коефіцієнт тепловіддачі огорожувальних конструкцій .....	1,2
Площа обігрівальних труб з урахуванням коефіцієнта оребрення $k_{\text{ор}}$ , $\text{м}^2$ .....	19,5; 2,9
Швидкість циркуляції теплоносія, $\text{м/с}$ .....	0,025
Кількість пасажирів, люд.....	52
Теплоємність вагона $C_{\text{ваг}}$ , кДж.....	11000
Теплоємність системи опалення $C_{\text{оп}}$ , кДж.....	3600
Об'єм повітря, що подавався системою вентиляції, $\text{м}^3/\text{год}$ .....	1040

Розрахунки проводилися для однієї доби у два етапи.

Перший етап – при русі вагона. За графіком, наведеним на рис. 4, тривалість руху складала 420 хв (7 год). За графіком передбачені 4 зупинки тривалістю 5 хв

кожна, враховано середнє зменшення швидкості руху на станціях і перегонах, при цьому автоматично підтримувалася температура повітря в салоні вагона  $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .



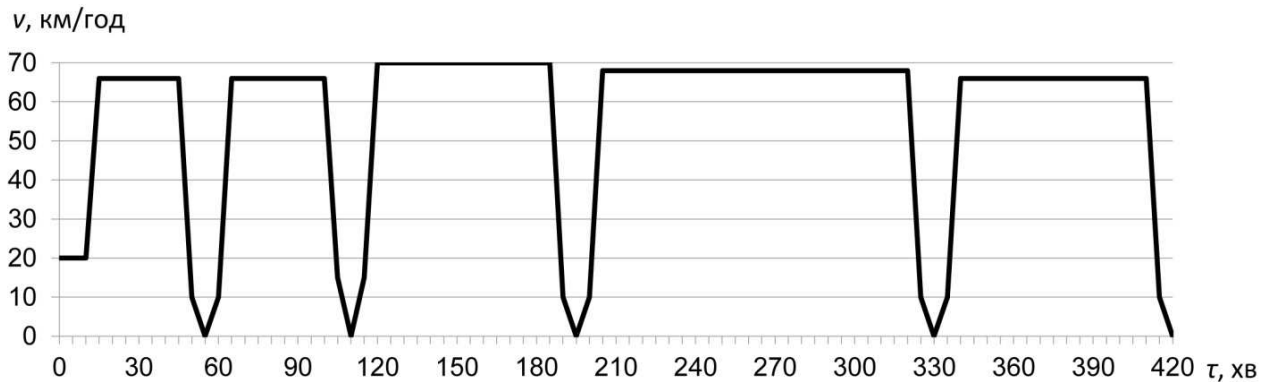


Рис. 4. Графік руху вагона

Другий етап – на стоянці в пункті обертання вагонів, тривалість 1 020 хв (17 год), автоматично підтримувалася температура повітря в салоні вагона  $20 \pm 2^\circ \text{C}$ .

Система працювала в автоматичному режимі, автоматичне керування зводилося до вмикання і вимикання високовольтних ТЕНів:

- при температурі теплоносія в котлі  $90^\circ \text{C}$  і  $85^\circ \text{C}$  відбувалося вимикання та вмикання відповідно нагрівальних високовольтних ТЕНів;

- при досягненні температури повітря в салоні вагона  $24^\circ \text{C}$  в русі та  $22^\circ \text{C}$  на стоянці в пункті обертання вагонів нагрівальні високовольтні ТЕНи вимикалися, поріг спрацьовування датчиків температури повітря в салоні вагона становив  $2^\circ \text{C}$ .

При русі вагона враховувалися такі показники:

- підвищення коефіцієнта тепловіддачі за рахунок конвекції на зовнішніх поверхнях огорожувальної конструкції залежно від швидкості руху, за графіком руху вагона на рис. 4;

- об'єм інфільтрації повітря залежно від швидкості руху, за графіком руху вагона на рис. 4.

Слід зазначити, що система вентиляції в пунктах формування та обертання вагонів не вмикається, тому на

другому етапі розрахунків вона не враховувалася.

Дані, що були отримані при проведенні математичного експерименту, представлені на графіках рис. 5 і 6.

Порівнюючи графіки 3 і 4 на рис. 5, побачимо, що модернізація не впливає на підтримання температурного режиму в салоні вагона. Кожне вмикання нагрівальних високовольтних ТЕНів за графіком 2 відбувається пізніше, ніж за графіком 1; це пов'язано з тим, що розвідні труби втрачають менше тепла; це тепло витрачається обігрівальними трубами на підтримання мікроклімату у вагоні, тоді температура теплоносія в системі опалення знижується повільніше.

Порівнюючи графіки 1 і 2 на рис. 6, побачимо, що втрати тепла через огорожувальні конструкції практично однакові. З даних, наведених на графіках 3 і 4 на рис. 6, видно, що додаткові витрати через дах вагона значно знизилися. Для більш точного аналізу підраховано витрати енергії на нагрівання теплоносія в системі опалення вагона, теплові втрати за рахунок огорожувальних конструкцій і додаткові втрати через дах вагона. Ці дані зведені в табл. 2 (для вагона без модернізації), табл. 3 (для модернізованого вагона).

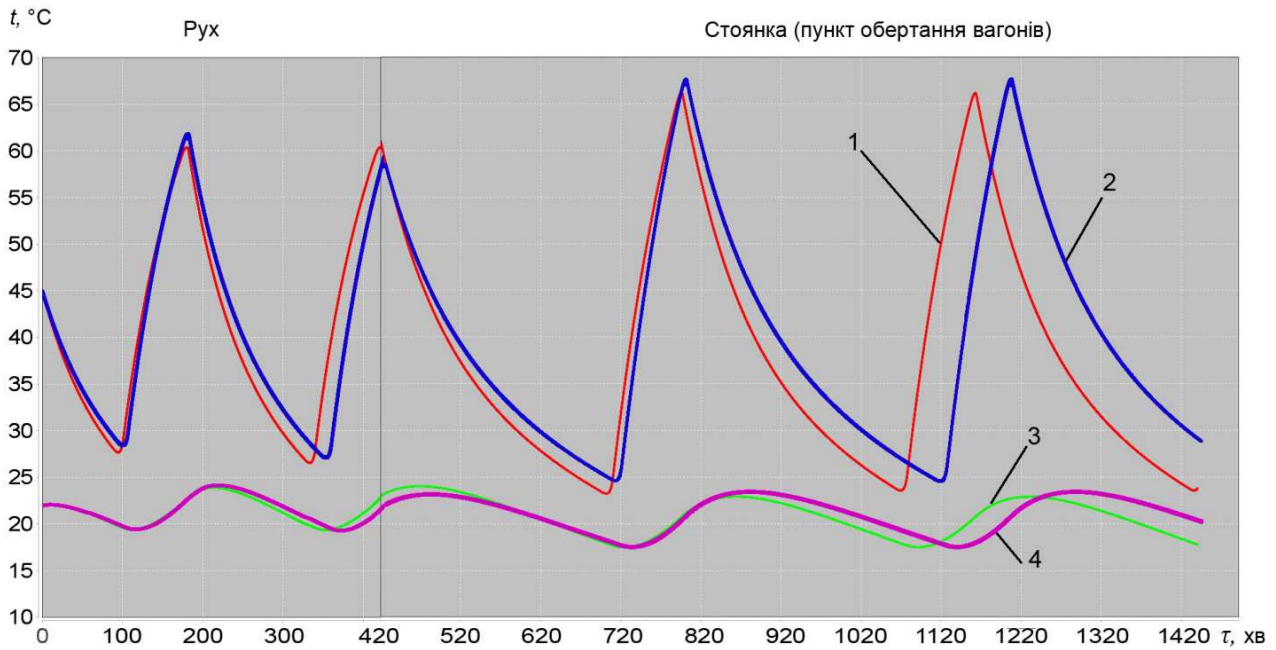


Рис. 5. Графіки температур води в котлі і повітря в салоні вагона:  
 1 – температура теплоносія в котлі у вагоні без модернізації; 2 – з модернізацією;  
 3 – температура повітря в салоні вагона без модернізації; 4 – з модернізацією

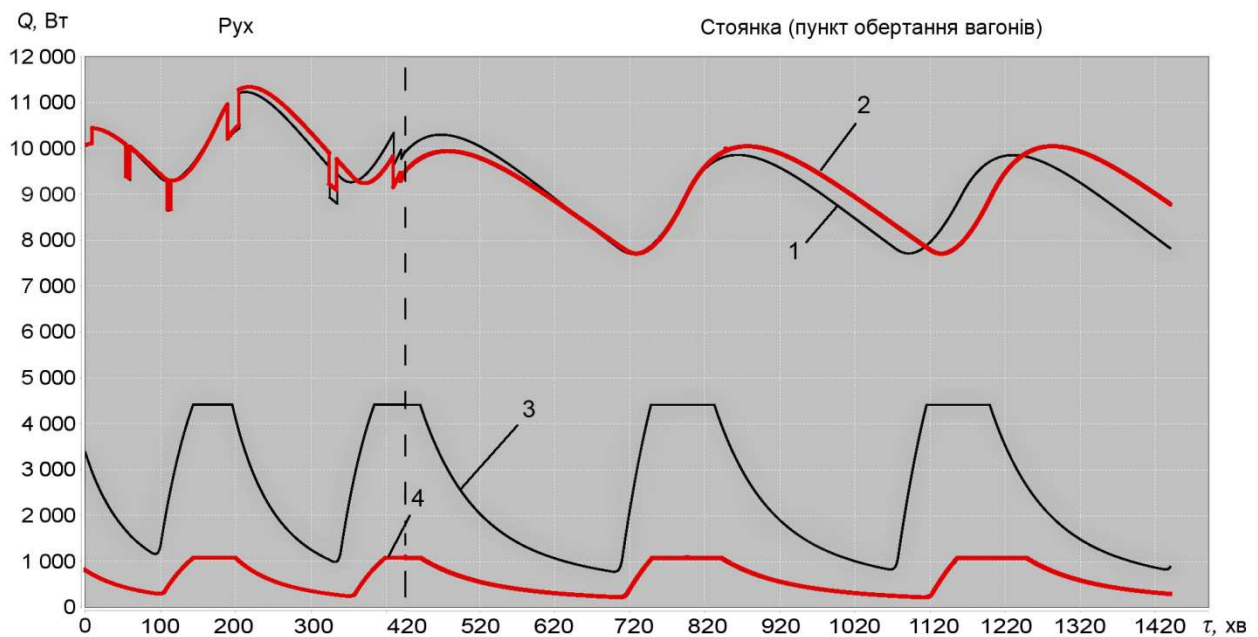


Рис. 6. Графіки теплових втрат за рахунок огорожувальних конструкцій:  
 1 – у вагоні без модернізації; 2 – з модернізацією; 3 – додаткові втрати тепла через дах вагона без модернізації; 4 – з модернізацією

Таблиця 2

## Сумарні дані витрат енергії у вагоні без модернізації

Вимірювальний параметр	Під час руху вагона	На стоянці вагона	Разом
Енергія, витрачена на нагрівання теплоносія високовольтними ТЕНами, кВт	131,7	158,7	290,4
Втрати через огорожувальні конструкції вагона, кВт	70,2	152,0	222,2
Додаткові втрати через дах вагона, кВт	19,0	40,4	59,4

Таблиця 3

## Сумарні дані витрат енергії в модернізованому вагоні

Вимірювальний параметр	Під час руху вагона	На стоянці вагона	Разом
Енергія, витрачена на нагрівання теплоносія високовольтними ТЕНами, кВт	112,0	131,1	243,1
Втрати через огорожувальні конструкції вагона, кВт	70,6	155,7	226,3
Додаткові втрати через дах вагона, кВт	4,7	10,9	15,6

Як видно з даних, наведених у табл. 2, додаткові втрати тепла через дах вагона складають близько 27 % втрат через огорожувальні конструкції і становлять близько 20 % витрат на підтримання мікроклімату у вагоні.

З наведених даних табл. 3 додаткові втрати тепла через дах вагона складають близько 7 % втрат через огорожувальні конструкції і становлять 6,6 % витрат на підтримання мікроклімату у вагоні. Отже, проведення даної модернізації дозволить підвищити енергоефективність опалювальної системи на 13,4 %.

**Обговорення результатів дослідження підвищення енергоефективності (з урахуванням результатів математичного моделювання теплових процесів).** Результати досліджень показали, що 20 % тепла не враховувалося в системі теплового балансу «система опалення – пасажирський вагон». На мікроклімат у вагоні через температуру декоративної стелі і тепловий

підпір повітря впливає 1/3 цього тепла, решта 2/3 втрачається через огорожувальні конструкції. Таким чином, використання вдосконаленої математичної моделі підвищить точність розрахунків витраченої енергії на підтримання мікроклімату на 20 %, температури повітря в салоні вагона на 6,6%, а теплових втрат через огорожувальні конструкції на 13,4 %.

За допомогою експериментальних вимірювань і вдосконаленої математичної моделі, яка дозволяє проводити комплексний аналіз теплових процесів пасажирського вагона з урахуванням конструктивних змін, запропоновано модернізацію системи опалення.

Результати показали, що модернізація системи опалення, яка підвищить енергоефективність системи опалення на 13,4 %, може бути реалізована при відносно низьких витратах шляхом заміни розвідних труб однією трубою, але з більшим

діаметром і розташуванням її в утепленому коробі з застосуванням комбінованого утеплювача.

Експлуатаційний парк пасажирських вагонів станом на 2016 рік складав 3 124 вагонів. За прогнозами роботи [13], потреба в експлуатаційному парку пасажирських вагонів на 2018 рік складатиме 2 366 вагонів; загальні витрати теплової енергії на підтримання мікроклімату в одному пасажирському вагоні на одну добу в опалювальний період складають близько 290,4 кВт теплової енергії, мінімальний опалювальний період триває 166 діб; за опалювальний період пасажирський вагон у середньому споживає 48,2 МВт теплової енергії. Експлуатаційний парк споживатиме 114,1 ГВт теплової енергії. За рахунок запропонованої модернізації витрати на опалення експлуатаційного парку можна знизити на 15,3 ГВт теплової енергії або в перерахунок – 25,9 млн грн на рік.

#### **Висновки:**

1. Удосконалена математична модель нестационарного теплового режиму пасажирського вагона дозволяє визначати температуру окремих його зон з

температурними полями, у яких розташовано додаткове джерело тепла. Завдяки цьому можна проводити комплексний аналіз теплових процесів пасажирського вагона з урахуванням конструктивних змін шляхом математичного експерименту.

2. Запропонована модернізація дуже приваблива, оскільки її легко реалізувати, економія від неї складатиме 25,9 млн грн на рік, крім того, не потрібні великі інвестиції. Таку модернізацію можна проводити і без заміни розвідних труб однією трубою більшого діаметра, в умовах сучасних вагоноремонтних депо, але ефективність такої модернізації знизиться.

3. Проведене дослідження дає підстави для зниження потужності системи опалення щонайменше на 10%. Це сприятиме зниженню металоємності системи опалення і, як наслідок, зниженню тари вагона. До цього ж при зниженні потужності системи опалення знизиться потужність електричних приладів, дротів, зменшиться кількість електронагрівальних ТЕНів, що розташовані в комбінованому електровугільному котлі.

#### *Список використаних джерел*

1. Energy efficiency of railway vehicles [Text] / N. Vetterli, U.-P. Menti, F. Sidler, E. Thaler, G. Zweife // CISBAT 2015 : Intern. Sci. Conf. (9.09–11.09.2015). – Lausanne, Switzerland, 2015. – P. 955–960.
2. Sweeney, E. Modification of Luas heating and ventilation systems to reduce energy consumption [Електронний ресурс] / E. Sweeney, J. Brunton // Irish Transport Research Network Conference : Conf. paper (5–6<sup>th</sup> Sept.) / Dublin Institute of Technology. – Dublin, Ireland, 2013. – Режим доступу: <http://arrow.dit.ie/engschmecccon/>. – Назва з екрана. – Перевірено : 03.01.2018.
3. Белошицкий, Э. В. Пути усовершенствования систем водяного отопления пассажирских вагонов [Текст] / Э. В. Белошицкий, С. С. Мямлин // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 174. – С. 50–60.
4. Kim, J. H. Design optimization for overhead ventilation duct system for a train using computational fluid dynamics and design of experiment [Text] / J.H. Kim, J.H. Rho // Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part E: Journal of process mechanical engineering. – 2017. – Vol. 231. – Iss. 5. – P. 914–929. doi: 10.1177/0954408916646403.
5. Хоменко, І. Ю. Удосконалення системи енергетичного та холодильного обладнання пасажирських вагонів при капітальних ремонтах [Текст] : дис... канд. техн. наук : 05.22.07 /

Хоменко Ірина Юріївна ; Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – 125 с.

6. Khomenko, I.Yu. Mathematical modeling of unsteady heat exchange in a passenger car [Text] / I.Yu. Khomenko // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 6 (48). – С. 147–155. doi: 10.15802/stp/2013/19762.

7. Емельянов, А. Л. Энергоэффективные транспортные системы кондиционирования воздуха [Текст] : дисс... д-ра техн. наук: 05.04.03 / А. Л. Емельянов; [Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики]. – СПб., 2016. – 384 с.

8. Зворыкин, М. Л. Кондиционирование воздуха в пассажирских вагонах [Текст] / М. Л. Зворыкин, В. М. Чекриз. – М. : Транспорт, 1977. – 286 с.

9. Китаев, Б. Н. Теплообменные процессы при эксплуатации вагонов [Текст] / Б. Н. Китаев. – М. : Транспорт, 1984. – 184 с.

10. Дмитриевская, Т. Ю. Система отопления – естественная циркуляция теплоносителя [Электронный ресурс] / Т. Ю. Дмитриевская // СОК – 2010. – № 1. – Режим доступа : <http://www.c-o-k.ru/articles/sistema-otopleniya-estestvennaya-cirkulyaciya-teplonositelya>. – Назв. с экрана. – Проверено : 03.01.2018.

11. Жариков, В. А. Климатические системы пассажирских вагонов [Текст] / В. А. Жариков. – М. : Трансинфо, 2006. – 135 с.

12. Жариков, В. А. Методика определения расхода энергии на отопление пассажирских вагонов [Текст] / В. А. Жариков, Б. Н. Китаев, Л. В. Разаренова. – М. : Транспорт, 1994. – 23 с.

13. Biloshytskyi E.V. Mathematical model of unsteady heat transfer of passenger car with heating system [Text] / E. V. Biloshytskyi // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 1 (73). – С. 121–130. doi 10.15802/stp2018/123409.

14. Програма (прогнозна) оновлення рухомого складу ПАТ «Укрзалізниця» на період до 2021 року [Електронний ресурс] / ПАТ «Укрзалізниця» // Презентаційні матеріали. – 2017. – Режим доступу: <http://eurotrain.railway-publish.com/assets/files/pdf/1.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено : 14.11.2017.

---

Білошицький Едуард Васильович, інженер-конструктор, «Проектно-конструкторське технологічне бюро» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Тел. +38 (056) 371 51 12. E-mail: e.beloshickiy@gmail.com, ORCID 0000-0002-2424-8479.

Белошицкий Эдуард Васильевич, инженер-конструктор «Проектно-конструкторское технологическое бюро» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Тел. +38 (056) 371 51 12. E-mail: e.beloshickiy@gmail.com, ORCID 0000-0002-2424-8479.

Biloshytskyi Eduard, Engineering Designer «Project design and technological bureau» Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Tel. +38 (056) 371 51 12. E-mail: e.beloshickiy@gmail.com, ORCID 0000-0002-2424-8479.

Статтю прийнято 17.09.2018 р.