

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.45.048.7

Е. В. БІЛОШИЦЬКИЙ^{1*}

^{1*}«Проектно-конструкторське технологічне бюро», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, ел. пошта e.beloshickiy@gmail.com, ORCID 0000-0002-2424-8479

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛООБМІНУ ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА З СИСТЕМОЮ ОПАЛЕННЯ

Мета. Існуючі математичні моделі нестационарних теплових процесів у пасажирському вагоні не в повній мірі відображають процеси, що відбуваються при використанні системи опалення. Крім того, нестационарні теплові процеси найчастіше досліджувалися в стаціонарному режимі, коли потоки та параметри теплового контуру постійні та не залежать від часу. У зв'язку з появою більш ефективних технічних рішень системи життєзабезпечення виникла потреба й у створенні нового математичного апарату, який давав би змогу врахувати ці особливості та їх вплив на перебіг нестационарних теплових процесів протягом усього рейсу. Мета даної роботи – створення математичної моделі теплового режиму пасажирського вагона з системою опалення, що враховує нестационарність теплових процесів. **Методика.** Для реалізації поставленої задачі методом моделювання була створена система диференціальних рівнянь, які описують нестационарні теплові процеси при опаленні пасажирського вагона; для розв'язання складеної системи рівнянь використовувався метод елементарних балансів. **Результати.** Розроблено розрахунковий алгоритм та створено комп'ютерну програму для моделювання перехідних теплових процесів у пасажирському вагоні локомотивної тяги, що дозволяє враховувати різні конструктивні рішення системи життєзабезпечення пасажирських вагонів та здійснювати моделювання нестационарних теплових процесів на будь-якому етапі рейсу. **Наукова новизна.** Вперше розроблено математичну модель теплових процесів у вагоні з системою опалення, що дозволяє, на відміну від існуючих моделей, досліджувати нестационарність теплотехнічного стану в салоні вагона за різних умов експлуатації та порівнювати роботу різних систем життєзабезпечення з точки зору їх конструктивних рішень. **Практична значимість.** Розроблена математична модель нестационарного теплового режиму пасажирського вагона з системою опалення для оцінки ефективності нестационарних перехідних температурних станів у приміщеннях пасажирського вагону з урахуванням особливостей конструкції системи опалення та нормативних вимог. Це дозволяє здійснювати розробку й реалізацію оптимальних технічних характеристик приладів опалення та побудову алгоритму керування їх роботою відповідно до умов експлуатації, у тому числі з урахуванням теплової інерції вагону при перехідних режимах роботи системи опалення шляхом математичного моделювання.

Ключові слова: математичне моделювання; пасажирський вагон; нестационарні теплові процеси; система опалення

Вступ

У даний час математичне моделювання широко використовується для оцінки ефективності різних конструктивних рішень. Особливістю математичного моделювання є великий обсяг обчислювальної роботи, тому останнім часом, в умовах доступності та поліпшення можливостей комп'ютерної техніки, чисельні експериме-

нти набули широкого поширення. Математичне моделювання з використанням відповідних математичних моделей має багато спільного з натурним експериментом. Цей спосіб дослідження дозволяє моделювати процеси, що виникають при реальній експлуатації з використанням окремого обладнання та систем життєзабезпечення в цілому, і з урахуванням впливу на них різних факторів. В основу математичного мо-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

делювання покладено метод диференціальних балансних рівнянь [9].

Математичне моделювання теплових процесів пасажирського вагона описує системи опалення, які, як правило, реалізуються в стаціонарному режимі, коли теплові потоки і параметри теплового контуру постійні, не залежать від часу. Під стаціонарним режимом розуміється ситуація у вагоні, коли дотримується баланс між тепловою енергією, що надходить і що віддається огорожувальними конструкціями в зовнішнє середовище. Енергетичний баланс такої системи в стаціонарному режимі вивчений досить добре [4–8, 12]. Але, будь-який теплообмін носить динамічний характер, і для його опису одного стаціонарного режиму недостатньо. Гірша ситуація з аналізом теплового стану опалюваних вагонів у нестаціонарних умовах, зокрема, при відключенні нагрівальних високоевольтивних ТЕНів системи опалення, під час руху і на стоянках із подальшим нагріванням, у результаті чого виникають перехідні режими опалення.

Математичну модель теплового стану вагона при опаленні повітряною системою опалення розглянуто в роботах [15–17], а при роботі вагонного кондиціонера в режимі теплового насоса – у роботах [3, 13]. У роботах [2, 14] розглянуто математичне моделювання нестаціонарних теплообмінних процесів пасажирського вагона з системами кондиціонування. Ці математичні моделі схожі між собою і дозволяють досить легко вводити та виводити до розрахункової схеми додаткові елементи, в яких для обігріву і охолодження в якості теплоносія використовується потік повітря. Приведені математичні моделі не в повній мірі відображають теплові процеси, що протікають у вагоні при використанні водяної системи опалення, де проміжним теплоносієм є вода. Відсутні такі показники як акумуляція теплової енергії [1].

У роботах, присвячених системам опалення пасажирських вагонів, вказується, що для вагона потрібні системи опалення потужністю 48 кВт (у зимовий період). Ці вимоги були обґрунтовані в 70–80-ті роки минулого століття для вагонів із ефективною теплопровідністю близько $1,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при навколишньому середовищу взимку з температурою мінус 40°C , з числом пасажирів від 32 до 60 осіб (розгляну-

ті Б. Н. Китаєвим [6, 7], Л. Д. Кузьмінім [9], В. А. Жаріковим [4, 5], Ю. П. Сидоровим [11] та іншими дослідниками).

Вже на початку ХХІ століття вагонобудівники ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» досягли ефективної провідності в пасажирському вагоні – близько $(0,8 \div 1,0) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а встановлення склопакетів істотно підвищило його герметичність.

Таким чином, з урахуванням конструктивних змін вагона і нових тенденцій в опаленні потрібен більш ретельний аналіз теплового режиму з урахуванням нестаціонарності теплових процесів при опаленні пасажирського вагона.

Мета

Було створено математичну модель нестаціонарного теплового режиму пасажирського вагона з водяною системою опалення для оцінки ролі нестаціонарних, перехідних температурних станів у пасажирському вагоні, підбору оптимальних технічних характеристик приладів опалення і побудови алгоритму керування їх роботою відповідно до умов експлуатації, у тому числі з огляду на прояв теплової інерції вагона при перехідних режимах роботи системи опалення.

Методика

Для реалізації поставленої задачі було складено систему диференціальних рівнянь, що описують нестаціонарні теплові процеси при опаленні пасажирського вагона; для розв'язання складеної системи рівнянь використовувався метод елементарних балансів.

При дослідженні перехідних режимів у процесі експлуатації під час охолодження і подальшого нагрівання пасажирського вагона враховуються умови, коли тепло від ТЕНів сприймається проміжним теплоносієм і потім передається до вагону. Аналогічно охолодженню вагона від початкової температури до критичної, при якій починається наступний процес нагрівання. Динамічне рівняння температурного процесу в цьому випадку має вирішуватися в дві стадії: по відношенню до проміжного теплоносія, а від теплоносія до повітря у вагоні і далі – до зовнішнього повітря.

При моделюванні теплових процесів вагона були враховані фізично виправдані й експери-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ментально підтвержені особливості теплового стану вагона, а саме:

– температура внутрішніх перегородок вагона практично збігається з температурою повітря у вагоні;

– різниця температур між внутрішньою стінкою огорожувальної конструкції з температурою t_c і середньооб'ємною температурою повітря t_n у вагоні не перевищує 3 К, оскільки різниця температур між зовнішнім середовищем із температурою t_n і повітрям вагона з температурою t_c в основному погашається його теплоізоляцією;

– температура повітря, що видаляється з вагона через дефлектори, дорівнює температурі повітря у вагоні t_n .

– за рахунок підвищення коефіцієнта тепловіддачі і конвекції на зовнішніх поверхнях огорожувальної конструкції (залежно від швидкості руху вагона від 0 до 80 км/год) теплопередача кузова вагона зростає на 10 %, при швидкостях руху від 80 до 160 км/год, коефіцієнт зростає на 1 %;

– об'єм інфільтрації повітря залежно від швидкості руху вагона (до 120 км/год) може досягати 325 м³/год;

Фізична сутність цих рівнянь зводиться до наступного.

Тепловий потік виділяється електричними ТЕНами $Q_{ТЕН}(\tau)$ у проміжок часу τ , передається проміжному теплоносію і металевій конструкції системи опалення. Оскільки прилади опалення фізично не можуть відразу передати весь тепловий потік $Q_{ТЕН}(\tau)$, що виділяється ТЕНами, частина цього тепла акумулюється в теплоносії і металевій конструкції системи опалення Q_{on} .

Відповідно до закону збереження енергії (теплового балансу), тепловий потік $Q_{ТЕН}(\tau)$ витрачається на чотири основні складові:

$$Q_{ТЕН}(\tau) = Q_{on} + Q_{mp} + Q_{кл} + Q_{ол}, \quad (1)$$

де Q_{on} – тепло, що акумульоване системою опалення; Q_{mp} – тепло, що витрачається обігрівальними трубами; $Q_{кл}$ – тепло, що витрачається теплоносієм на підігрів зовнішнього повітря; $Q_{ол}$ – тепло, що витрачається на нагрівання води для гарячого водопостачання (оскільки бойлер не впливає на мікроклімат у приміщенні

вагона і має незначне споживання тепла, у подальшому цей параметр враховуватися не буде).

Перераховані складові визначаються співвідношеннями:

$$Q_{on} = C_{on} \frac{dt}{d\tau}, \quad (2)$$

$$Q_{mp} = c_w G_w (t_{ex} - t_{вх}), \quad (3)$$

$$Q_{кл} = c_w G_w (t_{ex} - t_{еух}), \quad (4)$$

де C_{on} – сумарна теплоємність води і металевій конструкції системи опалення; t_{ex} – температура теплоносія на вході в обігрівальні труби і калорифер; $t_{еух}$ – температура теплоносія на виході з обігрівальних труб визначається за формулою:

$$t_{вх} = t_n + (t_0 - t_n) e^{-al}, \quad (5)$$

де t_0 – температура теплоносія на вході в обігрівальні труби; t_n – температура повітря приміщення; l – довжина обігрівальних труб; a – коефіцієнт, що визначається виразом:

$$a = -\frac{4k_{mp}D_n}{c_w \rho_w D_e^2 \omega_w}, \quad (6)$$

де k_{mp} – коефіцієнт тепловіддачі обігрівальних труб; D_n, D_e – зовнішній і внутрішній діаметр обігрівальних труб; ρ_w – щільність матеріалу теплоносія; ω_w – швидкість теплоносія в обігрівальних трубах.

Для аналізу теплового режиму системи опалення вагона рівняння (1) ÷ (3) необхідно доповнити ще одним рівнянням для розрахунку нагрівання й охолодження теплоносія в системі опалення від заданої початкової температури $t(0)$ до деякої кінцевої температури t_k за короткий проміжок часу τ , яке на будь-якому етапі має вид:

$$t_k(\tau) = t(0) + \frac{Q_{ТЕН} - (Q_{mp} + Q_{кл})}{C_{on}} \tau. \quad (7)$$

Кількість тепла, що надходить у вагон від $Q_{mp}(\tau)$, як видно з рівняння (3), залежить від температури теплоносія, площі обігрівальних труб, коефіцієнта тепловіддачі k_{mp} , швидкості

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

циркуляції теплоносія в обігрівальних трубах. Тепло $Q_n(\tau)$, що віддається повітряним потоком V_3 в момент часу τ , однозначно пов'язане зі зміною його ентальпії і визначається співвідношенням:

$$Q_n(\tau) = (I(t_n^k \phi_n^k) - I(t_n \phi_n)) \rho_n V_3(\tau), \quad (8)$$

де $I(t_n^k \phi_n^k)$ – питома ентальпія, температура і відносна вологість повітря, яке надходить у вагон після підігрівання в калорифері; $I(t_n \phi_n)$ – питома ентальпія, температура і відносна вологість повітря в вагоні; V_3 – обсяг зовнішнього повітря, що подається системою вентиляції; для визначення питомої ентальпії повітря використовується $I d$ – діаграма вологого повітря; t_n^k – температура повітря, що підігрівається калорифером, визначається виразом:

$$t_n^k = \frac{c_w G_w (t_{ex} - t_{вх})}{c_n \rho_n V_3} + t_3. \quad (9)$$

Тепло, що внесене підігрітим зовнішнім повітрям, можна визначити й іншим, менш точним вираженням:

$$Q_n(\tau) = c_n \rho_n V_3 (t_n^k - t_n)(\tau). \quad (10)$$

Теплові потоки $Q_{mp}(\tau)$, $Q_n(\tau)$, $Q_l(\tau)$, що надходять у вагон в момент часу τ , поглинаються трьома складовими:

$$(Q_l + Q_n + Q_{mp})(\tau) = Q_{вум} + Q_{инф} + Q_{ваг}, \quad (11)$$

де $Q_{вум}$ – тепло, що втрачається огорожувальними конструкціями, у тому числі й вікнами; $Q_{инф}$ – тепло, що витрачається на нагрівання холодного повітря, яке проникає через нещільності кузова і характеризується функцією $V_{инф}(S)$, тобто обсягом інфільтрованого повітря в залежності від швидкості руху; $Q_{ваг}$ – тепло, що витрачається на нагрівання внутрішнього повітря і обладнання вагона;

Перераховані складові визначаються співвідношеннями:

$$Q_{вум} = k_3 F_3 (t_n - t_3), \quad (12)$$

$$Q_{инф} = c_n \rho_n V_{инф} (t_n - t_3), \quad (13)$$

$$Q_{ваг} = C_{ваг} \frac{dt}{d\tau}, \quad (14)$$

де k_3 – коефіцієнт теплопередачі через зовнішні огорожувальні поверхні; F_3 – площа зовнішніх огорожувальних поверхонь; t_n – температура повітря в приміщенні; t_3 – температура зовнішнього повітря; c_n – теплоємність повітря; ρ_n – щільність повітря; $V_{инф}$ – об'єм повітря, внесенного у вагон в результаті інфільтрації; $C_{ваг}$ – сумарна теплоємність усіх внутрішніх перегородок, дерев'яної обшивки зовнішніх огорожень вагона і половини теплоємності теплозахисного шару.

Для комплексного аналізу теплового режиму в приміщенні вагона необхідно ще одне рівняння, для розрахунку нагрівання й охолодження температури повітря в приміщенні вагона від заданої початкової температури $t(0)$ до деякої кінцевої температури t_n за короткий проміжок часу τ , має вигляд:

$$t_n(\tau) = t(0) + \left(\frac{(Q_{mp} + Q_e + Q_l) - (-Q_{вум} + Q_{инф})}{C_{ваг}} \right) \tau. \quad (15)$$

Доцільно виділити кілька найбільш характерних етапів теплового режиму вагона, у рамках кожного з яких зберігаються практично постійні значення вихідних параметрів:

$$c_n; c_w; \rho_n; \rho_w; k_3; F_3; \phi_n; C_{ваг}; C_{он}; G_w = const. \quad (16)$$

При обмеженнях (16) рівняння (7), (15) мають на кожному окремому етапі своє, індивідуальне аналітичне рішення виду (17), (18):

Рівняння, що описує зміну температури повітря (15), набуває вигляду:

$$\frac{dt_n}{d\tau} = \frac{Q_{mp} + (Q_l + Q_n - Q_{инф}) - Q_{вум}}{C_{ваг}}, \quad (17)$$

де крокова частина залежить як від t_n , так і від $t_{ex} = t_k$.

Отже, це рівняння двох змінних:

$$t_n = t_n(\tau) \quad \text{і} \quad t_{ex} = t_k(\tau).$$

Рівняння, що описує температуру теплоносія в котлі (7), набуває вигляду:

$$\frac{dt_k}{d\tau} = \frac{Q_{ТЭН} - (Q_{mp} + Q_{кл})}{C_{он}}, \quad (18)$$

де права частина також залежить від t_n і t_k .

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Отже, маємо систему двох диференціальних рівнянь із двома змінними:

$$\begin{cases} \frac{dt_n}{d\tau} = \frac{Q_{mp} + (Q_l + Q_n - Q_{инф}) - Q_{аит}}{C_{ваг}}; \\ \frac{dt_k}{d\tau} = \frac{Q_{ТЭН} - (Q_{mp} + Q_{кл})}{C_{он}}. \end{cases} \quad (19)$$

Згрупування правих частин рівнянь відносно змінних t_n й t_k після перетворень надає рівнянням виду:

$$\begin{pmatrix} (C_w G_w - e^{-al} \cdot C_w G_w) t_k + \\ (C_w G_w e^{-al} - C_w G_w - k_3 F_3) \times \\ t_n + (Q_l + Q_n - Q_{инф}) + \\ k_3 F_3 t_3 \end{pmatrix} / C_{ваг} = \quad (20)$$

$$= \varepsilon_1 t_k + o_1 t_n + \theta_1$$

де ε_1, o_2 – показники теплової інертності вагона на етапі, що розглядається; θ_1 – показник теплової ентропії вагона на етапі, що розглядається:

$$\varepsilon_1 = \frac{C_w G_w (1 - e^{-al})}{C_{ваг}}, \quad (21)$$

$$o_1 = \frac{C_w G_w \cdot (e^{-al} - 1) - k_3 F_3}{C_{ваг}}, \quad (22)$$

$$\theta_1 = \frac{(Q_l + Q_n - Q_{инф}) + k_3 F_3 t_3}{C_{ваг}}, \quad (23)$$

$$\frac{(e^{-al} - 1) C_w G_w t_k + (1 - e^{-al}) C_w G_w t_n}{C_{он}} + \quad (24)$$

$$\frac{Q_{ТЭН} - Q_{кл}}{C_{он}} = \varepsilon_2 t_k + o_2 t_n + \theta_2$$

де ε_2, o_2 – показники теплової інертності системи опалення на етапі, що розглядається; θ_2 – показник теплової ентропії системи опалення на етапі, що розглядається:

$$\varepsilon_2 = \frac{(e^{-al} - 1) C_w G_w}{C_{он}}, \quad (25)$$

$$o_2 = \frac{(1 - e^{-al}) C_w G_w}{C_{он}}, \quad (26)$$

$$\theta_2 = \frac{Q_{ТЭН} - Q_{кл}}{C_{он}}, \quad (27)$$

Таким чином, початкова система рівнянь має вид:

$$\begin{cases} \frac{dt_n}{d\tau} = \varepsilon_1 t_k + o_1 t_n + \theta_1; \\ \frac{dt_k}{d\tau} = \varepsilon_2 t_k + o_2 t_n + \theta_2, \end{cases} \quad (28)$$

Тобто, це лінійні рівняння зі сталими коефіцієнтами.

Лінійне неоднорідне рівняння другого порядку зі сторонніми коефіцієнтами має вигляд:

$$t_k'' + p \cdot t_k' + g \cdot t_k = f, \quad (29)$$

$$p = -(o_1 + \varepsilon_2), \quad (30)$$

$$g = o_1 \varepsilon_2 - \varepsilon_1 o_2, \quad (31)$$

$$f = o_2 \theta_1 - o_1 \theta_2. \quad (32)$$

Тоді дискримінант характеристичного рівняння:

$$D = p^2 - 4g. \quad (33)$$

Розв'язок однорідних рівнянь для температури котла і приміщення вагона набуває вигляду:

$$t_k(\tau) = K_1 e^{R_1 \tau} + K_2 e^{R_2 \tau} + \frac{f}{g}, \quad (34)$$

$$t_n(\tau) = \frac{K_1 R_1 e^{R_1 \tau} + K_2 R_2 e^{R_2 \tau} - A_2 t_k - C_2}{B_2}, \quad (35)$$

де R_1, R_2 – корені характеристичного рівняння:

$$R_1 = \frac{-p - \sqrt{D}}{2}, \quad (36)$$

$$R_2 = \frac{-p + \sqrt{D}}{2}. \quad (37)$$

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$K_1 = \left[\begin{array}{c} \alpha_2 t_n(0) + \theta_2 + \varepsilon_1 \cdot \frac{f}{g} - \\ -(R_2 - \varepsilon_2) \cdot \left(t_k(0) - \frac{f}{g} \right) \end{array} \right] / (R_1 - R_2), \quad (38)$$

$$K_2 = t_k(0) - \frac{f}{g} - K_1. \quad (39)$$

Вирази (34), (35) дозволяють оцінювати не тільки температуру теплоносія в комбінованому електровугільному котлі і температуру повітря всередині вагона, а й допомагають проводити комплексні аналізи теплових процесів при опаленні пасажирського вагона з урахуванням конструктивних змін вагонів або нестационарності цих процесів та оцінювати ефективність роботи системи «система опалення–пасажирський вагон». Для цього повинні бути відомі початкові, на цьому етапі, температури ($t_k(0)$, $t(0)$ – температури котла і всередині вагона) і значення вихідних параметрів.

Вхідні дані для розрахункової моделі

Площа кузова, м ²	330
Коефіцієнт теплопередачі огорожуючих конструкцій, з урахуванням швидкості руху	1,3
Обсяг інфільтрації, м ³ /год	200
Площа обігрівальних труб, з урахуванням коефіцієнта оребрення, м ² ·k _{оп}	19,5·2,9
Швидкість циркуляції теплоносія, м/с	0,04
Кількість пасажирів, чол.	52
Теплоємність вагона, C _{ваг} , кВт	3056
Теплоємність системи опалення, C _{оп} , кВт	1000
Коефіцієнт тепловіддачі обігрівальних труб, Вт/м ² ·К	10,8

Для апробації моделі було використано дані експерименту, які були отримані автором. Він проводився при русі поїзда, вагон № 26487, виготовленого КВЗ 1985 р., КВР 10.12.2014. Вимірювання температур проводилося стаціонарними засобами, температура повітря вагона вимірювалася двома термометрами, розташованими з котлової та некотлової сторони салону вагона, температура теплоносія в котлі вимірювалася штатним дистанційним термометром із виносним датчиком.

Як видно з даних, що приведені на рис. 1, результати моделювання досить добре збіга-

ються з результатами експерименту, тобто, побудовану модель можна вважати досить точною та використовувати для теоретичних досліджень.

Апробація математичної моделі при порівнянні з експериментальними даними. Грунтуючись на описаній вище математичній моделі, було побудовано розрахункову модель температурного стану вагона при використанні водяної опалювальної системи з природною циркуляцією і дискретним двоступінчастим підведенням тепла великої потужності (2 групи по 24 кВт).

Для спрощення об'єм інфільтрації приймався від середньої швидкості руху. Теплоємність внутрішнього обладнання і системи опалення прийнята у водяному еквіваленті. Теплопродуктивність комбінованого водонагрівального котла 24+24 кВт. Робота системи вентиляції не враховувалася, при експерименті вона не вмикалася.

Розміри та фізичні параметри елементів, що були використані для побудови розрахункової моделі, надані нижче.

Результати

На основі обчислювального алгоритму була розроблена комп'ютерна програма для проведення комплексного аналізу теплових процесів при опаленні пасажирського вагона з урахуванням конструктивних змін і нестационарності процесів, ефективності оцінювання роботи системи опалення у пасажирських вагонах.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Наукова новизна та практична значимість

Була складена математична модель нестационарного теплового режиму пасажирського вагона з водяною системою опалення для оцінки ролі нестационарних, перехідних температурних станів пасажирського вагона, з урахуванням особливостей, які визначаються існуючими вимогами. Це дозволяє проводити підбір оптимальних технічних характеристик приладів опалення і побудови алгоритму керування їх роботою, відповідно до умов експлуатації,

в тому числі з огляду на прояв теплової інерції вагона при перехідних режимах роботи системи опалення. Для математичного моделювання нестационарного теплового режиму пасажирського вагона з водяною системою опалення застосований метод елементарного балансу. Модель дає змогу імітувати роботу системи опалення, провести комплексний аналіз теплових процесів при опаленні пасажирського вагона, з урахуванням конструктивних змін і нестационарності процесів та з подальшим оцінюванням ефективності їх роботи.

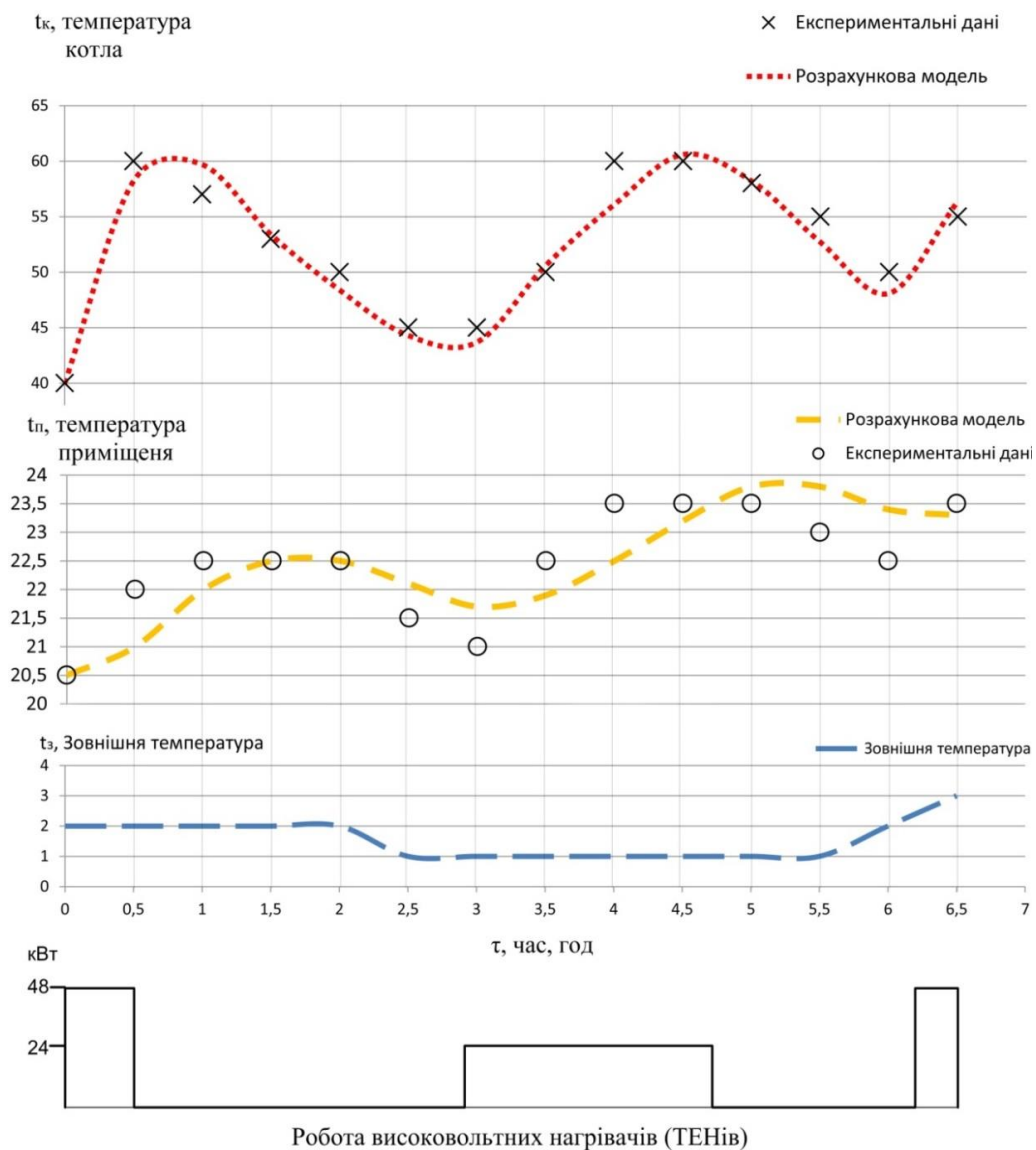


Рис. 1. Експериментальні графіки температур і розрахункової моделі

Висновок

У статті представлена математична модель нестационарних процесів теплообміну в пасажирських вагонах при використанні системи опалення. Проаналізовані існуючі математичні моделі, які не в повній мірі відображають теплові процеси, що протікають у вагоні при використанні водяної системи опалення, де проміжним теплоносієм є вода. На основі системи диференціальних рівнянь, що характеризують нестійкі процеси теплообміну в пасажирському вагоні, був розроблений обчислювальний алгоритм. Розроблена комп'ютерна програма для проведення комплексного аналізу теплових процесів при опаленні пасажирського вагона, з урахуванням конструктивних змін і нестационарності процесів, оцінки ефективності роботи шляхом математичного експерименту.

ференціальних рівнянь, що характеризують нестійкі процеси теплообміну в пасажирському вагоні, був розроблений обчислювальний алгоритм. Розроблена комп'ютерна програма для проведення комплексного аналізу теплових процесів при опаленні пасажирського вагона, з урахуванням конструктивних змін і нестационарності процесів, оцінки ефективності роботи шляхом математичного експерименту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белименко, С. С. Разработка критериев эффективности заряда и разряда твердотельного теплового аккумулятора / С. С. Белименко, В. А. Ищенко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 7–16. doi: 10.15802/stp/2014/29945.
2. Емельянов, А. Л. Обобщенная математическая модель нестационарного теплового режима пассажирского вагона с СКВ [Электронный ресурс] / А. Л. Емельянов, С. Е. Буравой, Е. С. Платунов // Науч. журнал НИУ ИТМО. Серия: «Холодильная техника и кондиционирование». – 2007. – № 1. – Режим доступа: <http://refrigeration.ihtb.ifmo.ru/file/article/7695.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено : 03.01.2018.
3. Емельянов, А. Л. Энергоэффективные транспортные системы кондиционирования воздуха : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.03 / Емельянов Анатолий Леонович ; Санкт-Петербург. нац. исслед. ун-т информ. технологий механики и оптики. – Санкт-Петербург, 2016. – 384 с.
4. Жариков, В. А. Климатические системы пассажирских вагонов / В. А. Жариков. – Москва : Трансинфо, 2006. – 135 с.
5. Жариков, В. А. Методика определения расхода энергии на отопление пассажирских вагонов / В. А. Жариков, Б. Н. Китаев, Л. В. Разаренова. – Москва : Транспорт, 1994. – 23 с.
6. Китаев, Б. Н. Повышение эффективности теплообменных процессов в пассажирских вагонах / Б. Н. Китаев, В. А. Жариков. – Москва : Транспорт, 1995. – 53 с.
7. Китаев, Б. Н. Теплообменные процессы при эксплуатации вагонов / Б. Н. Китаев. – Москва : Транспорт, 1984. – 184 с.
8. Кондиционирование воздуха в пассажирских вагонах и на локомотивах / М. Г. Маханько, Ю. П. Сидоров [и др.]. – Москва : Транспорт, 1981. – 254 с.
9. Системы вентиляции и установки кондиционирования воздуха. Вагоны / под ред. Л. Д. Кузьмина. – Москва : Машиностроение, 1978. – 376 с.
10. Моделирование монопольных услуг / А. В. Пуговкин, А. Ю. Антонова, И. А. Заречная [и др.] // Докл. Томс. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – № 2 (20). – С. 80–86.
11. Сидоров, Ю. П. Основы кондиционирования воздуха на предприятиях железнодорожного транспорта и в подвижном составе / Ю. П. Сидоров. – Москва : Транспорт, 1978. – 199 с.
12. Фаерштейн, Ю. О. Кондиционирование воздуха в пассажирских вагонах / Ю. О. Фаерштейн, Б. Н. Китаев. – Москва : Транспорт, 1984. – 272 с.
13. Хоменко, І. Ю. Удосконалення системи енергетичного та холодильного обладнання пасажирських вагонів при капітальних ремонтах : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Хоменко Ірина Юріївна ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – 125 с.
14. Khomenko, I. Yu. Mathematical modeling of unsteady heat exchange in a passenger car / I. Yu. Khomenko // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 6 (48). – С. 147–155. doi: 10.15802/stp/2013/19762.
15. Kim, J. H. Design optimization for overhead ventilation duct system for a train using computational fluid dynamics and design of experiment / 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.
16. 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 (5–6th Sept.) / Dublin Institute of Technology. – Dublin, Ireland, 2013. – Режим доступу: <http://arrow.dit.ie/engschmecon/>. – Назва з екрана. – Перевірено : 03.01.2018.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

17. Energy efficiency of railway vehicles / 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.

Э. В. БЕЛОШИЦКИЙ^{1*}

^{1*}«Проектно-конструкторское технологическое бюро», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, эл. почта e.beloshickiy@gmail.com, ORCID 0000-0002-2424-8479

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ С СИСТЕМОЙ ОТОПЛЕНИЯ

Цель. Существующие математические модели нестационарных тепловых процессов в пассажирском вагоне не в полной мере отражают процессы, протекающие при использовании системы отопления. Кроме того, нестационарные тепловые процессы чаще всего исследовались в стационарном режиме, когда потоки и параметры теплового контура постоянные, не зависящие от времени. В связи с появлением более эффективных технических решений системы жизнеобеспечения возникла необходимость в создании нового математического аппарата, который давал бы возможность учесть эти особенности и их влияние на ход нестационарных тепловых процессов в течение всего времени рейса. Цель данной работы – создание математической модели теплового режима пассажирского вагона с системой отопления, учитывающую нестационарность тепловых процессов. **Методика.** Для реализации поставленной задачи методом моделирования была создана система дифференциальных уравнений, которые описывают нестационарные тепловые процессы при отоплении пассажирского вагона; для решения составленной системы уравнений использовался метод элементарных балансов. **Результаты.** Разработан расчетный алгоритм и создана компьютерная программа для моделирования переходных тепловых процессов в пассажирском вагоне локомотивной тяги, позволяющая учитывать различные конструктивные решения системы жизнеобеспечения пассажирских вагонов и осуществлять моделирование нестационарных тепловых процессов на любом этапе рейса. **Научная новизна.** Впервые разработана математическая модель тепловых процессов в вагоне с системой отопления, позволяющая, в отличие от существующих моделей, исследовать нестационарность теплотехнического состояния в салоне вагона при различных условиях эксплуатации и сравнивать работу различных систем жизнеобеспечения с точки зрения их конструктивных решений. **Практическая значимость.** Разработана математическая модель нестационарного теплового режима пассажирского вагона с системой отопления для оценки эффективности нестационарных переходных температурных состояний в помещениях пассажирского вагона с учетом особенностей конструкции системы отопления и нормативных требований. Это позволяет осуществлять разработку и реализацию оптимальных технических характеристик приборов отопления и построения алгоритма управления их работой в соответствии с условиями эксплуатации, в том числе с учетом тепловой инерции вагона при переходных режимах работы системы отопления путем математического моделирования.

Ключевые слова: математическое моделирование; пассажирский вагон; нестационарные тепловые процессы; система отопления

E. V. BILOSHYTSKYI^{1*}

MATHEMATICAL MODEL OF UNSTEADY HEAT TRANSFER OF PASSENGER CAR WITH HEATING SYSTEM

^{1*}«Project Design and Technological Bureau», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 371 51 12, e-mail beloshickij@rambler.ru, ORCID 0000-0002-2424-8479

Purpose. The existing mathematical models of unsteady heat processes in a passenger car do not fully reflect the thermal processes, occurring in the car with a heating system. In addition, unsteady heat processes are often studied in steady regime, when the heat fluxes and the parameters of the thermal circuit are constant and do not depend on

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

time. In connection with the emergence of more effective technical solutions to the life support system there is a need for creating a new mathematical apparatus, which would allow to take into account these features and their influence on the course of unsteady heat processes throughout the travel time. The purpose of this work is to create a mathematical model of the heat regime of a passenger car with a heating system that takes into account the unsteady heat processes. **Methodology.** To achieve this task the author composed a system of differential equations, describing unsteady heat processes during the heating of a passenger car. For the solution of the composed system of equations, the author used the method of elementary balances. **Findings.** The paper presents the developed numerical algorithm and computer program for simulation of transitional heat processes in a locomotive traction passenger car, which allows taking into account the various constructive solutions of the life support system of passenger cars and to simulate unsteady heat processes at any stage of the trip. **Originality.** For the first time the author developed a mathematical model of heat processes in a car with a heating system, that unlike existing models, allows to investigate the unsteady heat engineering performance in the cabin of the car under different operating conditions and compare the work of various constructive solutions of life support systems. **Practical value.** The work presented the developed mathematical model of the unsteady heat regime of the passenger car with a heating system to estimate the efficiency of unsteady, transitional temperature states in passenger cars, taking into account the design features of the heating system and the regulatory requirements. This allows the development and implementation of optimal technical characteristics of heating appliances and the construction of an algorithm for controlling their operation in accordance with operating conditions, taking into account the thermal inertia of the car in the transitional modes of heating, on the basis of mathematical modeling.

Keywords: mathematical modelling; passenger car; unsteady heat processes; heating system.

REFERENCES

1. Belymenko, S. S., & Ishchenko, V. O. (2014). Development of criteria of charge and discharge efficiency of solid state of heat accumulator. *Science and Transport Progress*, 5(53), 7-16. doi: 10.15802/stp/2014/29945. (in Russian)
2. Yemelyanov, A. L., Buravoy, S. Y., & Platinov, Y. S. (2007). Obobshchennaya matematicheskaya model natsionarnogo teplovogo rezhima passazhirsko-go vagona s SKV. *Scientific journal of NRU ITMO. Series: Refrigeration and Air Conditioning*, 1. – Retrieved from : <http://refrigeration.ihbt.ifmo.ru/file/article/7695.pdf>. (in Russian)
3. Yemelyanov, A. L. (2016). *Energoeffektivnye transportnye sistemy konditsionirovaniya vozdukh*. (Disertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk). Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg. (in Russian)
4. Zharikov, V. A. (2006). *Klimaticheskkiye sistemy passazhirskikh vagonov*. Moscow: Transinfo. (in Russian)
5. Zharikov, V. A., Kitaev, B. N., & Razarenova, L. V. (1994). *Metodika opredeleniya rashkoda energii na otoplenie passazhirskikh vagonov*. Moscow: Transport. (in Russian)
6. Kitaev, B. N., & Zharikov, V. A. (1995). *Povysheniye effektivnosti teploobmennykh protsessov ekspluatatsii vagonov v passazhirskikh vagonakh*. Moscow: Transport. (in Russian)
7. Kitaev, B. N. (1984). *Teploobmennyye protsessy pri ekspluatatsii vagonov*. Moscow: Transport. (in Russian)
8. Makhanko, M. G., Sidorov, Y. P., et al. (1981). *Konditsionirovanie vozdukh v passazhirskikh vagonakh i na lokomotivakh*. Moscow: Transport. (in Russian)
9. Kuzmin, L. D. (Ed). (1978). *Sistemy ventilyatsii i ustanovki konditsionirovaniya vozdukh*. Vagony. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
10. Pugovkin, A. V., Antonova, A. Y., & Zarechnaya, I. A. (2009). Modelirovanie monopolnykh uslug. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2(20), 80-86. (in Russian)
11. Sidorov, Y. P. (1978). *Osnovy konditsionirovaniya vozdukh na predpriyatiyakh zheleznodorozhnogo transporta i v podvizhnom sostave*. Moscow: Transport. (in Russian)
12. Faershteyn, Y. O., & Kitaev, B. N. *Konditsionirovanie vozdukh v passazhirskikh vagonakh*. Moscow: Transport. (in Russian)
13. Khomenko, I. Y. (2014). *Udoskonalennia systemy enerhetychnoho ta kholodylnoho obladnannia pasazhyrskikh vahoniv pry kapitalnykh remontakh*. (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro. (in Ukrainian)
14. Khomenko, I. Y. (2013). Mathematical modeling of unsteady heat exchange in a passenger car. *Science and Transport Progress*, 6(48), 147-155. doi: 10.15802/stp2013/19762. (in English)
15. Kim, J. H., & Rho, J. H. (2017). Design optimization for overhead ventilation duct system for a train using computational fluid dynamics and design of experiment. *Proceedings of the institution of mechanical engi-*

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- neers part e-journal of process mechanical engineering*, 231(5), 914-929. doi: 10.1177/0954408916646403. (in English)
16. Sweeney, E., & Brunton, J. (2013) Modification of Luas heating and ventilation systems to reduce energy consumption. In *Irish Transport Research Network Conference: Conf. paper (5-6th Sept.)*. Dublin: Dublin Institute of Technoogy. Retrieved from <http://arrow.dit.ie/engschmecon/>. (in English)
17. Vetterli, N., Menti, U.-P., Sidler, F., Thaler, E., & Zweife, G. (2015). Energy efficiency of railway vehicles. In *Proceedings of the International Scientific Conference CISBAT 2015, September 9-11, 2015*, Lausanne. 955-960. (in English)

Prof. V. L. Horobets, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. V. O. Habrynets, D. Sc. (Tech.), (Ukraine)
recommended this article to be published

Received: Oct. 31, 2017
Accessed: Jan. 05, 2017