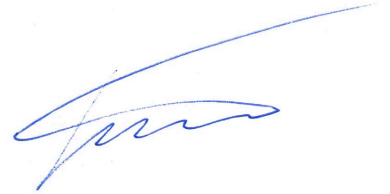


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна



Білошицький Едуард Васильович

УДК 629.454.2.048.4/7

**УДОСКОНАЛЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ТА
ВЕНТИЛЯЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ**

Спеціальність: 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Галузь знань 27 – транспорт

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі «Вагони та вагонне господарство» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Мямлін Сергій Віталійович,
Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний
інститут залізничного транспорту АТ «Укрзалізниця»,
перший заступник директора

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Фалендиш Анатолій Петрович,
Український державний університет залізничного
транспорту, завідувач кафедри «Теплотехніка та
теплові двигуни»

кандидат технічних наук, доцент

Іщенко Вадим Миколайович,
Київський інститут залізничного транспорту Державного
університету інфраструктури та технологій,
завідувач кафедри «Вагони та вагонне господарство»

Захист відбудеться «21» березня 2019 р. о 13⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна 2, ауд. 314, зал засідань.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна або на сайті за адресою: <http://diit.edu.ua/> (Наука – Захисти у спеціалізованій вченій раді Д 08.820.02).

Автореферат розісланий «14» лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



І. В. Жуковицький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Пасажирські перевезення є одним з основних видів діяльності залізничного транспорту. При цьому пасажирський рухомий склад є важливою складовою цього виду послуг, який повинен забезпечувати не тільки безпеку руху, але й комфортні умови перевезень. Комфортабельність пасажирського рухомого складу формується з урахуванням багатьох чинників: планування, дизайну внутрішнього обладнання, систем життєзабезпечення і якості їх роботи. При експлуатації пасажирського вагонного парку актуальним є напрямок, пов'язаний із забезпеченням комфортних умов проїзду пасажирів. Для цього використовуються відповідні системи життєзабезпечення, які й мають створювати комфортні умови в пасажирських вагонах.

Як показує досвід експлуатації пасажирського рухомого складу, при проектуванні вагонів недостатньо враховуються чинники, що впливають на рівень комфортності пасажирського вагона. Незадовільне використання вентиляційних систем пасажирських вагонів видається відсутністю її належної взаємодії з роботою системи опалення. Система опалення є однією з найважливіших і складних систем життєзабезпечення пасажирського рухомого складу, вона служить для підтримки комфортних умов у холодну пору року. Однак, конструкторами вагонів не повністю враховується низка чинників, що можуть впливати на температурний режим у пасажирському вагоні. Як відомо, на більшості пасажирських вагонів як основна використовується водяна система опалення.

У процесі експлуатації підтримувати необхідну температуру теплоносія відповідно до зовнішніх і внутрішніх параметрів в опалювальному котлі існуючої конструкції пасажирського вагона практично неможливо, у результаті чого виникають перехідні режими опалення, які викликають коливання температури повітря в пасажирських вагонах. Значна теплова інертність системи опалення посилює коливання температури повітря у вагоні. Цей процес ускладнюється ще й тим, що з підвищенням швидкостей руху зростають тепловтрати через огорожувальні конструкції кузова. Крім того, у теперішній час в експлуатованих пасажирських вагонах управління приладами опалення конструктивно не передбачене. Управління продуктивністю обігрівальних приладів можливе тільки регулюванням температури теплоносія в системі опалення.

Таким чином, удосконалення систем забезпечення мікроклімату (тут розуміємо, що мікроклімат – це сукупність кліматичних умов (температура, вологість повітря та ін.), що створюються в приміщенні на якій-небудь обмеженій території для нормального самопочуття людей), що входять у загальну систему життєзабезпечення пасажирських вагонів є одним з перспективних напрямків сучасних досліджень під час модернізації пасажирського рухомого складу залізниць і підвищені рівня його комфортабельності та енергоефективності. Забезпечення максимально комфортного рівня проїзду пасажирів підвищує конкурентоспроможність залізничного транспорту на ринку пасажирських перевезень. Тому тема дисертації, що спрямована на вдосконалення систем забезпечення мікроклімату пасажирських вагонів, є актуальною для залізничного транспорту України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано у відповідності до Концепції Програми оновлення рухомого складу, схваленої 29.11.2016 правлінням ПАТ «Укрзалізниця», що діє до 2021 року та відповідає

Транспортній стратегії України на період до 2020 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 2174-р від 20 жовтня 2010 року. Робота проводилася відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України, а саме: «Розвиток туристичних перевезень залізничним транспортом України» (№ державної реєстрації 0115U002424), «Науково-технічне забезпечення сталого розвитку залізничних перевезень в міжнародному сполученні «Україна – Євросоюз» (№ державної реєстрації 0117U004391). Автор є виконавцем цих науково-дослідних робіт та автором звітів, що враховують пріоритетні тематичні напрями наукових досліджень відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 07 вересня 2011 р. № 942 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року», «Енергетика та енергоефективність» в галузі енергоефективних технологій на транспорті.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення функціонування систем забезпечення параметрів мікроклімату в пасажирських вагонах із підвищенням енергоефективності цих систем за рахунок зниження непродуктивних витрат теплової енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз існуючого технічного стану систем життєзабезпечення пасажирських вагонів, які безпосередньо впливають на умови комфорту;
- провести аналіз наукових публікацій, які присвячені проблемам вдосконалення систем життєзабезпечення пасажирського рухомого складу;
- розробити математичну модель нестационарних теплових процесів у пасажирському рухомому складі для дослідження перехідних температурних станів у приміщеннях пасажирського вагона з урахуванням особливостей різних конструктивних рішень системи опалення;
- розробити імітаційні моделі пасажирських вагонів для проведення комплексного аналізу нестационарних теплових процесів під час опалення пасажирського вагона на різних етапах поїздки при перевезенні пасажирів ;
- виконати теоретичні та експериментальні дослідження параметрів мікроклімату пасажирських вагонів із різним конструктивним виконанням основних систем життєзабезпечення;
- розробити на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень технічні рішення з підвищення енергоефективності систем життєзабезпечення для існуючих конструкцій пасажирських вагонів;
- виконати техніко-економічне обґрунтування запропонованих технічних рішень.

Об'єктом дослідження є процес формування параметрів мікроклімату пасажирських вагонів при перехідних режимах роботи систем опалення та вентиляції.

Предметом дослідження є технічні рішення з підвищення ефективності функціонування систем опалення та вентиляції пасажирських вагонів з урахуванням показників їх енергоефективності.

Методи досліджень. Під час вирішення сформульованих завдань в дисертації використані фізично обґрунтовані методи узагальнення та ідеалізації об'єктів дослідження, побудови математичних моделей і наданий розрахунок аналітичними і

чисельними методами в поєднанні з експериментальними дослідженнями окремих структурних елементів з узагальненням отриманих результатів відповідно до об'єкта в цілому. При відпрацюванні технічних рішень з удосконалення систем життєзабезпечення пасажирського вагона застосовано методи аналізу та синтезу. При обробці результатів експериментальних досліджень застосовані статистичні методи.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі на основі викладених теоретичних і експериментальних досліджень вирішене актуальне наукове завдання з вдосконалення функціонування систем опалення та вентиляції пасажирських вагонів локомотивної тяги. До основних наукових результатів, отриманих автором особисто, і які виносяться на захист, відносяться наступні положення:

1. **Вперше** розроблено математичну модель нестационарних теплових процесів у пасажирському вагоні з водяною системою опалення, що за рахунок урахування динамічного характеру процесів дозволяє підвищити якість оцінки конструктивних рішень систем життєзабезпечення.
2. **Вперше** отримано комплексну залежність параметрів мікроклімату в приміщеннях пасажирського вагона локомотивної тяги від величини повітрообміну, обсягу інфільтрації та кількості пасажирів у вагоні, що дозволяє узгоджено керувати параметрами мікроклімату в часі з дотриманням умов теплового балансу.
3. **Удосконалено** метод керування продуктивністю калорифера з формуванням оптимального режиму функціонування за рахунок урахування взаємозв'язків між параметрами функціонування систем опалення та вентиляції пасажирського вагона локомотивної тяги, що дозволяє, на відміну від існуючих, суттєво покращити якісні показники мікроклімату та підвищити енергоефективність пасажирського вагона локомотивної тяги.
4. **Набули подальшого розвитку** методи аналізу параметрів теплового балансу пасажирського вагона локомотивної тяги за рахунок виділення зон температурних полів всередині вагона, що дозволяє зменшити непродуктивні витрати теплової енергії та покращити показники комфорту для пасажирів.

Практичне значення отриманих результатів визначається розробленими технічними рішеннями з вдосконалення систем опалення, що підвищують комфортні умови для проїзду пасажирів, впровадження яких не потребує значних капітальних вкладень. Підвищення енергоефективності від їх використання складає 27,4 %. Це дає підстави для зниження потужності системи опалення щонайменше на 25 %, що сприятиме зниженню металоемності системи опалення і, як наслідок, сприяє зниженню тари пасажирського вагона. Завдяки зниженню потужності системи опалення знизиться також потужність високовольтного обладнання: головного роз'єднувача, контакторів, запобіжників, зменшиться поперечний переріз дротів і кількість електронагрівальних приладів (ТЕНів).

Результати виконання дисертаційних досліджень у вигляді математичних моделей впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна та використовуються під час підготовки бакалаврів, магістрів за спеціалізацією «Енергетичний менеджмент та енергоефективність у промисловій та комунальній сфері», за спеціальністю [144] «Теплоенергетика» (акт впровадження від 10 вересня 2018 р.). Результати

дисертаційного дослідження у вигляді математичної моделі і програми «Терло» для дослідження теплових процесів усередині пасажирського вагона впроваджено в ПКТБ з проектування і модернізації рухомого складу, колії та штучних споруд Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна; вони використовуються для оцінки конструкторських рішень на стадіях проектування систем опалення і вентиляції (акт впровадження від 17 вересня 2018 р.). Результати експериментальних досліджень впроваджені у виробництво в пасажирському депо «Львів» ПКВЧД–8 Пасажирської компанії АТ «Укрзалізниця» (акт впровадження від 12 жовтня 2018 р.).

Особистий внесок здобувача полягає в плануванні та проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів, розробці нових конструктивних рішень. Результати виконаних досліджень містяться в роботах [1 – 17]. Роботи [2, 4–10, 13, 14] виконано без співавторів. У роботах, які надруковано у співавторстві, здобувачеві належить наступне:

[1] – проведено аналіз технічної можливості підвищення ефективності функціонування систем опалення пасажирських вагонів та запропоновано відповідні технічні та технологічні рішення;

[3] – запропоновано підвищення швидкості природної циркуляції теплоносія в системі опалення і збільшення теплопередавальної поверхні обігрівальних труб. Виконано розрахунки параметрів мікроклімату;

[11] – проведено аналіз способів регулювання опалювальних приладів, підібраний оптимальний спосіб регулювання системи опалення пасажирських вагонів;

[12] – обґрунтовано удосконалення конструкції елементів системи життєзабезпечення пасажирського вагона та виконано відповідні теоретичні дослідження;

[15, 16] – підготовка технічних рішень та опису корисної моделі;

[17] – запропоновано автоматизацію роботи водяного калорифера для підтримки заданої температури нагрітого в калорифері зовнішнього повітря, що подається системою вентиляції; розроблено математичну модель взаємодії систем опалення та вентиляції пасажирських вагонів; підібрана видаткова характеристика регульованого клапана; виконано теоретичні дослідження роботи калорифера.

Апробація результатів дисертації. Основні ідеї, положення та результати дисертаційної роботи представлені та обговорені на 75-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2015 р.), 76-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2016 р.), 77-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, 2017 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні методики, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук» (м. Люблін, Республіка Польща, 2017 р.), 78-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, 2018 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Ключові питання освіти та науки: перспективи розвитку для України та Польщі» (м. Стальова Воля, Республіка Польща, 2018 р.).

Матеріали дисертаційної роботи в повному обсязі доповідалися на засіданні

міжкафедрального наукового семінару Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна 25 жовтня 2018 року.

Публікації. За результатами проведених досліджень за темою дисертації опубліковано 17 наукових робіт, з яких: 6 статей, в тому числі 5 статей – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, у тому числі 1 стаття – за кордоном та 4 статті – у спеціалізованих наукових виданнях, що входять до переліку фахових видань, 2 патенти України на корисні моделі, 9 тез доповідей Міжнародних наукових конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів із висновками та загальних висновків. Повний обсяг дисертації складає 151 сторінку, з яких основний текст дисертації складає 131 сторінку, у роботі міститься 19 таблиць, з них – 1 таблиця на 1-й окремій сторінці, 32 рисунки, список літератури з 144 джерел викладено на 16 сторінках, додатки – на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету роботи та основні задачі, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети, приведено основні наукові положення та результати, які винесено на захист та обґрунтовано практичну цінність отриманих результатів, а також подано дані про апробацію і публікації основних матеріалів досліджень.

У першому розділі виконано аналіз сучасного технічного стану пасажирських вагонів компанії АТ «Укрзалізниця», а особливо їх систем життєзабезпечення. Визначено, що переважна кількість вагонів пасажирського парку залізниць України обладнана водяними системами опалення, які не в повній мірі забезпечують сучасні вимоги до комфорту, що пред'являються до нових вагонів. Окрім того, розглядається ефективність технічних рішень, спрямованих на вдосконалення конструкції вагонних систем опалення та вентиляції як в Україні, так і в цілому по залізницях СНД, також розглянуто вдосконалення систем життєзабезпечення сучасної системи легкорейкового транспорту Luas, діючої в Дубліні (Ірландія), і пасажирських вагонів Швейцарії компанії Swiss Rhaetian Railway (RhB). Встановлено, що в умовах реформування пасажирського господарства, при істотному зносі рухомого складу і невдосконаленій інфраструктурі, використання повітряних систем опалення не раціональне. Зокрема, відмова від водяної системи опалення з комбінованим котлом для пасажирських вагонів на теперішній час неможлива.

Детально проаналізовано ефективність роботи цих систем, встановлено, що системи опалення пасажирських вагонів мають два принципові недоліки: по-перше, відсутність належної автоматизації роботи з підтримки стабільного температурного режиму у вагонах, що обумовлено великою тепловою інерційністю у результаті чого виникають перехідні режими опалення, які викликають коливання температури в пасажирських вагонах. По-друге, через низьку швидкість природної циркуляції води в трубах опалення виникає зниження тепловіддачі опалювальних приладів, яке ускладнюється ще одним фактором – нерівномірною тепловіддачею обігрівальних труб. Відсутність належної взаємодії систем вентиляції і опалення викликають, як наслідок, незадовільне використання вентиляційної системи пасажирського вагона. Аналіз досліджень теплозахисних властивостей пасажирських вагонів свідчить, що

обсяг інфільтрації ($V_{\text{інф}}$) зовнішнього повітря, яке проникає у вагон через нещільності в дверях і кузові, досягає $325 \div 514 \text{ м}^3/\text{год}$, при зміні швидкості руху від зупинки до $120 \text{ км}/\text{год}$, при більш високих швидкостях інфільтрація буде ще значнішою. Оскільки конструкції систем опалення пасажирського експлуатаційного парку вагонів розроблено ще у 70 – 80 роки минулого сторіччя, коли проблема забезпечення нормованих параметрів мікроклімату вирішувалася в основному за рахунок збільшення потужності опалювальних приладів, то вони потребують вдосконалення.

У **другому розділі** дисертації запропоновано опис математичної моделі нестационарного теплового режиму пасажирського вагона з водяною системою опалення, що за рахунок урахування динамічного характеру процесів дозволяє підвищити якість оцінювання конструктивних рішень систем життєзабезпечення, досліджувати нестационарність теплового стану в приміщеннях вагона за різних умов експлуатації та здійснювати порівняльний аналіз різних конструктивних рішень систем життєзабезпечення пасажирських вагонів.

Тепловий потік виділяється електричними ТЕНами $Q_{\text{ТЕН}}(\tau)$ у проміжок часу τ , передається проміжному теплоносію і металевій конструкції системи опалення і потім передається до вагона. Оскільки прилади опалення фізично не можуть відразу передати весь тепловий потік $Q_{\text{ТЕН}}(\tau)$, що виділяється ТЕНами, частина цього тепла акумулюється в теплоносії й металевих конструкціях системи опалення $Q_{\text{оп}}$. Цей випадок описується рівняннями, які мають вирішуватися в дві стадії: по відношенню до теплоносія та від теплоносія до повітря у вагоні і далі – до зовнішнього повітря.

Для комплексного аналізу теплового режиму приміщення вагона необхідно два рівняння: для розрахунку нагрівання і охолодження теплоносія в котлі і повітря в приміщенні вагона (від заданих початкових температур $t_{\text{к}}(0)$ і $t_{\text{п}}(0)$ до кінцевих температур $t_{\text{к}}$ і $t_{\text{п}}$ за проміжок часу τ), які мають наступний вигляд:

$$t_{\text{к}}(\tau) = t_{\text{к}}(0) + \frac{Q_{\text{ТЕН}} - (Q_{\text{тр}} + Q_{\text{кл}})}{C_{\text{оп}}} \tau, \quad (1)$$

$$t_{\text{п}}(\tau) = t_{\text{п}}(0) + \frac{(Q_{\text{тр}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{л}}) - (Q_{\text{вит}} + Q_{\text{інф}})}{C_{\text{ваг}}} \tau. \quad (2)$$

де $C_{\text{ваг}}$ – сумарна теплоємність всіх внутрішніх перегородок, дерев'яної обшивки зовнішніх огорожень вагона і половини теплоємності теплозахисного шару;

$Q_{\text{тр}}$ – тепло, що витрачається обігрівальними трубами;

$Q_{\text{кл}}$ – тепло, що витрачається теплоносієм на підігрів зовнішнього повітря;

$Q_{\text{л}}$ – тепло, що виділяється пасажирами;

$Q_{\text{п}}$ – тепло, яке внесене підігрітим зовнішнім повітрям;

$Q_{\text{вит}}$ – тепло, що витрачається через огорожувальні конструкції, зокрема й вікна;

$Q_{\text{інф}}$ – тепло, що витрачається на нагрівання холодного повітря, що просякає через нещільності кузова і характеризується функцією $V_{\text{інф}}(S)$, тобто обсяг повітря, яке інфільтрується залежно від швидкості руху.

Рівняння, що описує зміну температури повітря, наступне:

$$\frac{dt_{\text{п}}}{d\tau} = \frac{Q_{\text{тр}} + (Q_{\text{л}} + Q_{\text{п}} - Q_{\text{інф}}) - Q_{\text{вит}}}{C_{\text{ваг}}}, \quad (3)$$

де крокова частина залежить як від $t_{\text{п}}$, так і від $t_{\text{к}}$.

Отже, це – рівняння двох змінних:

$$t_{\text{п}}(\tau) \quad \text{і} \quad t_{\text{к}}(\tau).$$

Рівняння, що описує температуру теплоносія в котлі, набуває вигляду:

$$\frac{dt_{\text{к}}}{d\tau} = \frac{Q_{\text{ГЕН}}\eta - (Q_{\text{ТР}} + Q_{\text{КЛ}})}{C_{\text{оп}}}, \quad (4)$$

де права частина так само залежить від $t_{\text{п}}$ і $t_{\text{к}}$.

Таким чином, маємо систему двох диференціальних рівнянь з двома змінними: Після згрупування правих частин рівнянь відносно змінних $t_{\text{п}}$ й $t_{\text{к}}$ і після перетворень початкова система рівнянь має вигляд лінійних рівнянь із сталими коефіцієнтами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dt_{\text{п}}}{d\tau} = \frac{Q_{\text{ТР}} + (Q_{\text{Л}} + Q_{\text{П}} - Q_{\text{ИНФ}}) - Q_{\text{ВИГ}}}{C_{\text{ВАГ}}} \\ \frac{dt_{\text{к}}}{d\tau} = \frac{Q_{\text{ГЕН}}\eta - (Q_{\text{ТР}} + Q_{\text{КЛ}})}{C_{\text{оп}}} \end{array} \right\}, \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dt_{\text{п}}}{d\tau} = \varepsilon_1 t_{\text{к}} + o_1 t_{\text{п}} + \theta_1 \\ \frac{dt_{\text{к}}}{d\tau} = \varepsilon_2 t_{\text{к}} + o_2 t_{\text{п}} + \theta_2 \end{array} \right. \quad (5)$$

де $\varepsilon_1, o_1, \varepsilon_2, o_2$ – показники теплової інертності вагона і системи опалення відповідно на етапі, що розглядається;

θ_1, θ_2 – показники теплової ентропії вагона і системи опалення відповідно на етапі, що розглядається:

Лінійне неоднорідне рівняння другого порядку зі сторонніми коефіцієнтами має вигляд:

$$t_{\text{к}}'' + p \cdot t_{\text{к}}' + g \cdot t_{\text{к}} = f, \quad (6)$$

де

$$p = -(o_1 + \varepsilon_2); \quad g = o_1 \varepsilon_2 - \varepsilon_1 o_2; \quad f = o_2 \theta_1 - o_1 \theta_2. \quad (7)$$

Дискримінант характеристичного рівняння

$$D = p^2 - 4g. \quad (8)$$

Розв'язки однорідних рівнянь для температури котла і приміщення вагона відповідно мають вигляд:

$$t_{\text{к}}(\tau) = K_1 e^{R_1 \tau} + K_2 e^{R_2 \tau} + \frac{f}{g}, \quad (9)$$

$$t_{\text{п}}(\tau) = \frac{K_1 R_1 e^{R_1 \tau} + K_2 R_2 e^{R_2 \tau} - \varepsilon_2 t_{\text{к}} - \theta_2}{o_2}, \quad (10)$$

де R_1, R_2 – корені характеристичних рівнянь:

$$R_1 = \frac{-p - \sqrt{D}}{2}, \quad R_2 = \frac{-p + \sqrt{D}}{2}, \quad (11)$$

$$K_1 = \frac{o_2 t_{\text{п}}(0) + \theta_2 + \varepsilon_1 \cdot \frac{f}{g} - (R_2 - \varepsilon_2) \cdot \left(t_{\text{к}}(0) - \frac{f}{g} \right)}{R_1 - R_2}, \quad K_2 = t_{\text{к}}(0) - \frac{f}{g} - K_1. \quad (12)$$

Ці вирази дозволяють оцінити не тільки коливання температури теплоносія в комбінованому електровугільному котлі і повітря всередині вагона, а також провести

комплексний аналіз теплових процесів при опаленні пасажирського вагона, але й враховують конструктивні зміни і нестационарний характер процесів теплообміну та передбачають оцінювання ефективності роботи системи «система опалення – пасажирський вагон». Для цього повинні бути відомі початкові температури $t_k(0)$ і $t_n(0)$ котла і повітря всередині вагона й значення вихідних параметрів на цьому етапі.

Для оцінки адекватності математичної моделі було використано дані експериментальних досліджень, що отримані особисто автором; результати моделювання та дані експерименту узгоджуються для температур повітря на 91,5 % і для теплоносія в котлі на 90,3 %, що свідчить про достатню точність математичної моделі. Автором розроблений також обчислювальний алгоритм і комп'ютерна програма для моделювання теплових процесів у пасажирському вагоні.

У **третьому розділі** дисертації представлено основні результати виконаного комплексу теоретичних досліджень, що були спрямовані на забезпечення стійкого температурного режиму в приміщеннях вагона та підвищення енергоефективності системи опалення, розроблено й запропоновано низку науково обґрунтованих конструктивних рішень для поліпшення функціонування та взаємодії систем життєзабезпечення.

Автором розроблені відповідні імітаційні моделі пасажирських вагонів для програми моделювання – для проведення комплексного аналізу нестационарних теплових процесів при опаленні пасажирського вагона на будь-якому етапі рейсу поїзда; запропонована модель була відкалібрована за допомогою вимірів, проведених автором, враховуючи й тепловиділення від пасажирів. Вихідні дані для кожної моделі складаються з геометричних та фізичних характеристик вагона, враховуються системи життєзабезпечення, включаючи керування ними, внутрішні припливи тепла та зовнішні умови (температура, вітер, швидкість руху).



Рисунок 1 – Схема енергетичних потоків пасажирських вагонів

Генерована діаграма енергетичних потоків (рис. 1), на якій показаний енергетичний баланс пасажирських вагонів, отриманий на основі кліматичних даних за

опалювальний період 2017 – 2018 років (середня температура повітря в опалювальний період по кліматичній зоні України), тобто визначена загальна кількість тепла: припливи (ліворуч) і витрати тепла (праворуч).

При генерації діаграми і у подальших розрахунках враховувався коефіцієнт використання експлуатаційного парку пасажирських вагонів, який дорівнює 0,35. Ураховуючи дані діаграми енергетичних потоків, було запропоновано заходи оптимізації.

На другому етапі теоретичних досліджень визначені заходи були перевірені на розробленій імітаційній моделі пасажирських вагонів та був розрахований їх потенціал енергозбереження.

На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень визначені найбільш реалізуємі методи, що можна виконати на існуючих конструкціях пасажирських вагонів і які не потребують значних матеріальних витрат.

Виконано теоретичні дослідження утворення напору в системі опалення пасажирського вагона. На основі отриманих результатів проаналізовано основні технічні рішення із збільшення швидкості природної циркуляції, а саме – підведення теплоносія в обігрівальні труби по двох стояках або збільшення маси теплоносія в стояку, котре здійснюється шляхом збільшення площі його поперечного перерізу.

Як показали результати проведеного аналізу, підведення теплоносія в обігрівальні труби по двох стояках дозволяє збільшити швидкість природної циркуляції в 1,7 рази (70 %), а збільшення прохідного перерізу стояка менш ефективно – швидкість природної циркуляції збільшується в 1,25 рази (25 %). Таким чином, облаштування двох стояків дозволяє не застосовувати циркуляційний насос, що спрощує систему та зменшує додаткові витрати електроенергії.

Для більш точних розрахунків автором доопрацьована математична модель теплового стану пасажирського вагона. Рівняння для розрахунку нагрівання й охолодження температури повітря в приміщенні вагона і теплоносія в котлі доповнене величинами: $Q_{\text{тр}}^{\text{розв}}$ – тепло, що віддане розвідними трубами; $Q_{\text{вит}}^{\text{дах}}$ – додаткові тепловитрати через дах вагона; тоді вихідні рівняння набувають наступного вигляду:

$$t_{\text{к}}(\tau) = t_{\text{к}}(0) + \frac{Q_{\text{ГЕН}} - (Q_{\text{тр}} + Q_{\text{тр}}^{\text{розв}} + Q_{\text{кл}})}{C_{\text{оп}}} \tau, \quad (13)$$

$$t_{\text{п}}(\tau) = t(0) + \frac{(Q_{\text{тр}} + Q_{\text{тр}}^{\text{розв}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{л}}) - (Q_{\text{вит}} + Q_{\text{вит}}^{\text{дах}} + Q_{\text{инф}})}{C_{\text{ваг}}} \tau. \quad (14)$$

Як видно з цих формул щодо температури теплоносія в котлі, то до витрат тепла теплоносієм додалися ще витрати тепла розвідними трубами, а температура повітря в приміщенні пасажирського вагона розраховується з урахуванням температури тепловитрати, що віддається всіма трубами системи опалення, а до загальних тепловитрат додаються ще й додаткові – через дах вагона.

Для зменшення тепловитрат розвідними трубами пропонується теплоізоляція, яка виконана із застосуванням комбінованого утеплювача, який, крім базової основи з низькою теплопровідністю має віддзеркалюючий шар з тонкої полірованої алюмінієвої фольги.

Підраховані витрати енергії на нагрівання теплоносія в модернізованій системі опалення вагона свідчать, що підвищення енергоефективності опалювальної системи

складає 13,4 %. Використання доопрацьованої математичної моделі теплового балансу пасажирського вагона має підвищити точність розрахунків витраченої енергії на підтримання мікроклімату на 20 %, температури повітря в салоні вагона – на 6,6 %, а теплових витрат через огорожувальні конструкції – на 13,4 %.

Враховуючи, що величина $V_{\text{інф}}$ залежить від швидкості руху вагона, у тому числі й на стоянках, від швидкості вітру, то це й відображається залежністю $V_{\text{інф}}(S)$. Обсяг повітрообміну в дослідженні змінювався залежно від реальної потреби на конкретний момент часу з урахуванням кількості пасажирів у вагоні, зокрема для цього в приміщенні вагона можуть бути передбачені датчики CO_2 разом з керуванням подачею кількості припливного повітря від системи вентиляції, але для реалізації регулювання подачі зовнішнього повітря потрібна чітка взаємодія систем опалення й вентиляції.

Для реалізації взаємодії систем опалення та вентиляції автоматизована робота водяного калорифера: регульований клапан встановлений у водяний контур калорифера як керований прилад, а виносний датчик встановлений безпосередньо в повітропроводі після калорифера, по ходу руху підігрітого повітря – як керуючий прилад.

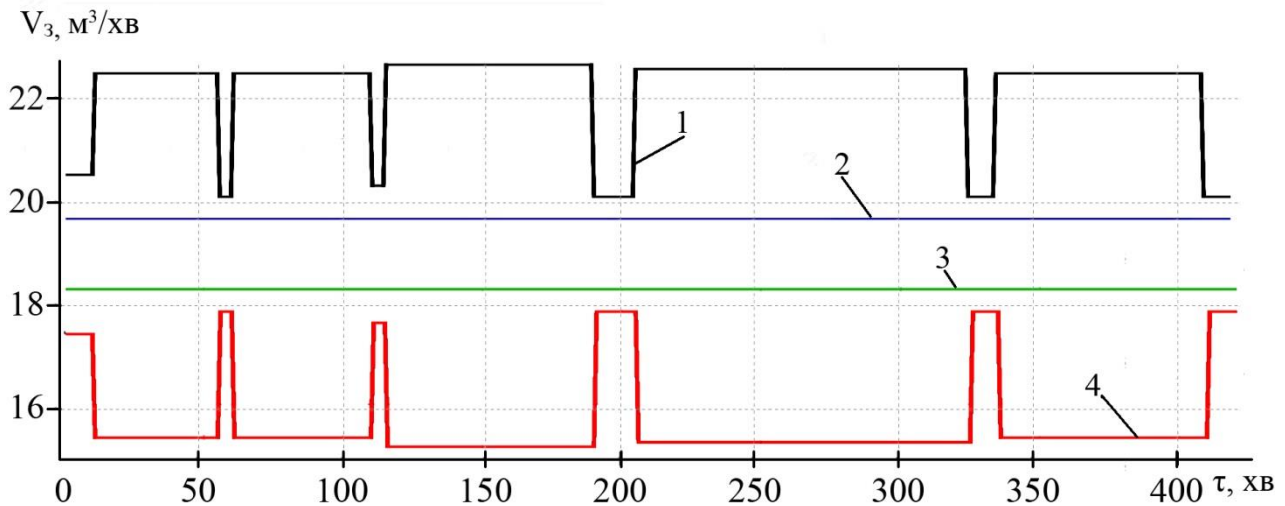


Рисунок 2 – Об'єм зовнішнього повітря, що надходить у вагон:

- 1 – подача вентиляцією й інфільтрація повітря, 2 – повітря, що подається системою вентиляції,
- 3 – подача повітря вентиляцією та інфільтрація з урахуванням роботи датчиків CO_2 ,
- 4 – повітря, що подається системою вентиляції з урахуванням роботи датчиків CO_2

Із даних, які наведено на графіках (рис. 2), видно, що при роботі датчиків CO_2 система вентиляції подає повітря з урахуванням обсягу інфільтрації і певного вмісту CO_2 в приміщенні вагона, що знижує надходження зовнішнього повітря у вагон, підтримуючи рівень CO_2 , який не перевищує нормативний.

За результатами проведеного дослідження методом чисельного експерименту, за результатами дії регульованого клапану, визначено, що температура нагрітого повітря, яке подається системою вентиляції, не перевищувала $24,5\text{ }^\circ\text{C}$. Але у випадку зниження температури повітря нижче $20\text{ }^\circ\text{C}$, що пов'язане зі зміною температури теплоносія в котлі, калорифер при таких температурах теплоносія в комбінованому котлі не розвивав потужність, необхідну для підігрівання припливного повітря до регламентованої температури $22 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$.

Визначено, що інтеграція датчиків CO_2 разом з автоматизацією роботи калорифера дає змогу підтримувати задану температуру зовнішнього повітря, що

подається системою вентиляції, і знижує витрати теплової енергії на підігрівання зовнішнього повітря на 18,5 % і на 10 % від загально витраченої енергії на підтримання мікроклімату у вагоні під час руху. Ураховуючи, що в пунктах формування і обороту поїздів вентиляцію відключено, то для однієї доби зниження витрат складатимуть 4,6 %.

Для забезпечення рівномірності прогрівання приміщень по довжині вагона повинні забезпечуватися однакові теплонадходження від кожного елемента обігрівальних труб. У роботах деяких авторів пропонується вирішення цієї задачі тільки збільшенням теплопередавальної поверхні обігрівальних труб за напрямком руху теплоносія, але автор пропонує змінювати тепловіддачу на потрібній ділянці обігрівальних труб шляхом нанесення на них покриття з певним ступенем чорноти.

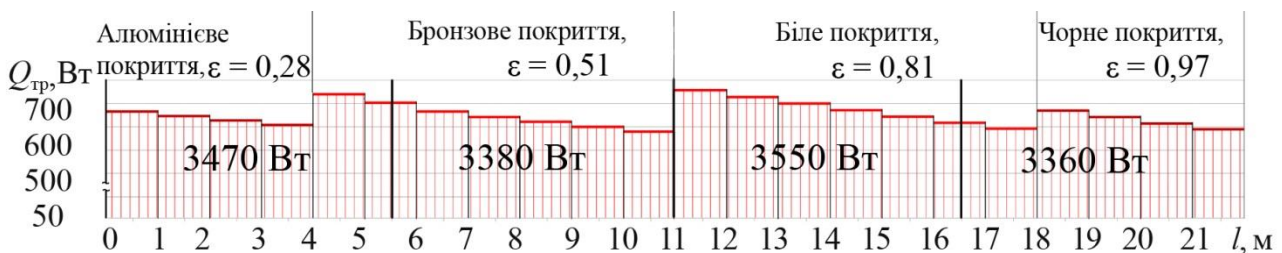


Рисунок 3 – Результати розрахунків обігрівальних труб з нанесенням покриття з різним ступенем чорноти

Результати теоретичних досліджень (рис. 3) показують, що на всіх ділянках обігрівальних труб забезпечується практично рівномірна тепловіддача по всій їх довжині, середні значення потужності між ділянками не перевищують 190 Вт.

Розглянутий спосіб істотно спрощує конструкцію опалювальної системи, знижує загальну тепловіддачу труб до 12 % і на 4,8 % від обсягу витрат на підтримання мікроклімату у вагоні, це пояснюється відсутністю перегрівання в тих частинах вагона, де температура теплоносія в обігрівальних трубах більша.

Керування потужністю обігрівальних труб зміною витрати теплоносія з урахуванням їх довжини (22 м) призведе до погіршення нерівномірного температурного режиму по довжині вагона. Керувати тепловіддачею обігрівальних труб можливо за рахунок вільної конвекції. Цього можна досягти шляхом встановлення на обігрівальні труби регульованих кожухів із тепловідбивним екраном: таким чином утворюється закритий простір, через який проходять обігрівальні труби, тоді нагріте повітря зможе проходити тільки через змінну площу отворів у верхній частині, що дозволить регулювати кількість повітря, котре циркулює через кожухи, і тим самим збільшувати або знижувати ступінь конвективного теплообміну на поверхні обігрівальних труб.

За даними, отриманими в результаті проведеного математичного моделювання, керування тепловіддачею обігрівальних труб за рахунок вільної конвекції повітря регульованими кожухами дозволяє знизити вплив теплової інертності системи опалення на температурний режим у вагоні, а також реалізувати індивідуальне регулювання температури повітря в купе (у межах 44 % від потужності ділянки обігрівальних труб). У системі опалення накопичується тепла енергія, і вона працює як тепловий акумулятор, при цьому виконує свої функції нагрівання; так акумулязоване тепло в системі опалення завжди буде доступне практично миттєво, при відкритті отворів, крім того, цей спосіб знижує витрати теплової енергії на 4,6 %.

У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень. Основною метою проведених експериментів було підтвердження результатів теоретичних досліджень з керування тепловіддачею обігрівальних труб за рахунок вільної конвекції. За одним із можливих способів керування тепловіддачею приладами обігріву, з метою підтримки стійкого температурного режиму в пасажирському вагоні, автором був проведений експеримент із застосуванням фізичної моделі – установки, що забезпечує керування конвективним теплообміном на поверхні обігрівальних труб.

Конструкція експериментальної установки імітує відрізок (частину, сегмент, ділянку) обігрівальних труб вагона, які накріті кожухом з регульованими отворами (рис. 4).

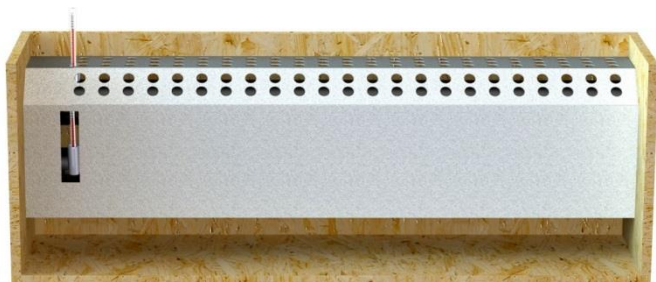


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд експериментальної установки

Експеримент включав в себе кілька етапів: підготовчий, перший, другий, третій; кожний етап проводився в декілька стадій.

На кожній стадії на всіх етапах проводилися виміри температури води в обігрівальних трубах і температури

повітря в приміщенні.

Перший етап – підтвердження гіпотези; представляв собою керування тепловіддачею обігрівальних труб способом обмеження конвекції. Для підтвердження гіпотези були проведені виміри в три стадії:

– перша стадія – кожух із регульованими отворами на експериментальну установку не встановлювався;

– друга стадія – кожух із регульованими отворами встановлений на експериментальну установку, конвекційні отвори повністю відкриті;

– третя стадія – кожух із регульованими отворами встановлений на експериментальну установку, конвекційні отвори закриті.

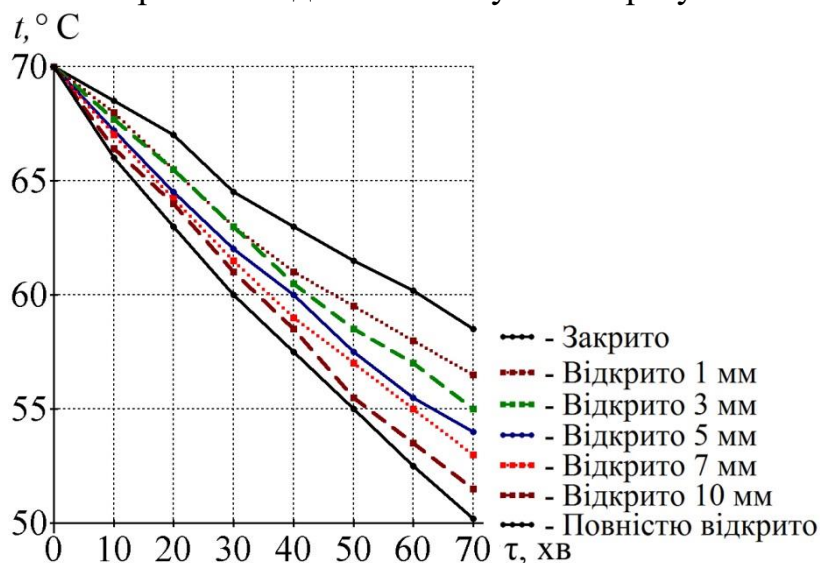


Рисунок 5 – Графіки зміни температури води в обігрівальних трубах експериментальної установки залежно від площі відчинених отворів (під час проведення першого і другого етапу експерименту)

експериментальну установку, конвекційні отвори закриті.

На другому етапі експерименту перевірялася можливість плавного регулювання тепловіддачі обігрівальних труб частковим обмеженням конвекції, шляхом поступового збільшення загальної площі відчиненого сегмента конвекційних отворів. Проведений аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень та моделювання показує незначні відхилення, а саме, з урахуванням абсолютної похибки, яка складає $1,0^\circ\text{C}$, – не більше ніж 4,7 %.

Зменшення загальної площі

відчиненого сегмента конвекційних отворів більше ніж на $0,0138 \text{ м}^2$, що відповідає відстані між отворами 10 мм і до повного закриття отворів знижує теплообмін конвекцією, що підтверджує можливість плавного регулювання тепловіддачею обігрівальних труб, частковим обмеженням конвекції (рис. 5).

Приведені результати свідчать про можливість керування тепловіддачею обігрівальних труб методом обмеження конвекції, а крім того, дають змогу вдосконалення існуючих систем опалення.

Третій етап – підтвердження можливості змінювання тепловіддачі на потрібній ділянці (сегменті) обігрівальних труб нанесенням покриття з певним ступенем чорноти. Для цього були проведені виміри в дві стадії: на першій стадії на обігрівальні труби експериментальної установки було нанесене алюмінієве покриття, на другій стадії – бронзове покриття.

Кожух із регульованими отворами на експериментальну установку в обох випадках не встановлювався.

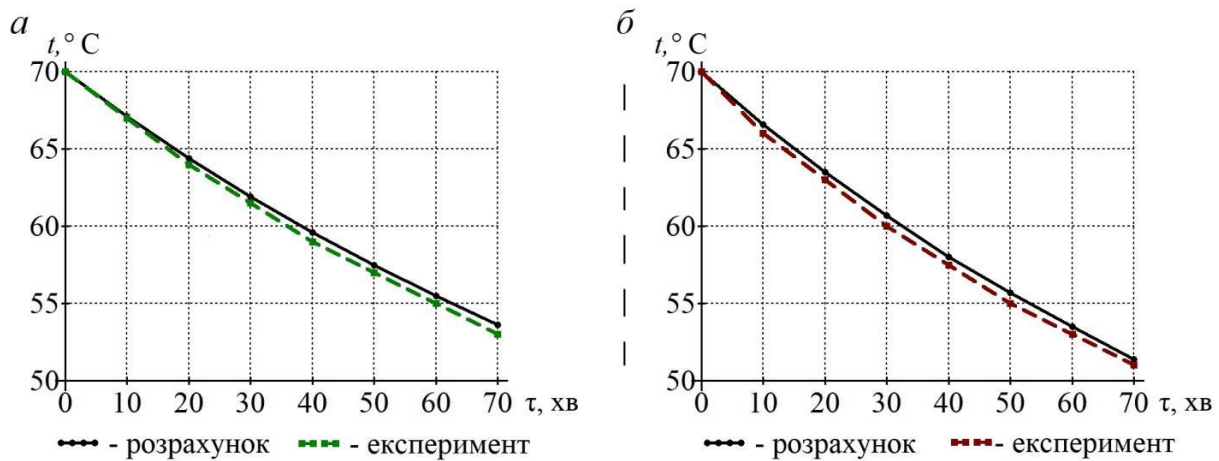


Рисунок 6 – Залежність температури води в обігрівальних трубах експериментальної установки від типу покриття труб:

а – алюмінієве та б – бронзове покриття

Проведений аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень та даних моделювання вказує на незначні відхилення результатів розрахунків з експериментом (із урахуванням абсолютної похибки, яка складає $1,0 \text{ °C}$, не більше ніж 6,4 %). Наведені результати свідчать про можливість диференційовано та в заданих межах змінювати тепловіддачу потрібних ділянок обігрівальних труб за рахунок варіювання типу покриття.

Але тут зауважимо, що змінювати тепловіддачу обігрівальних труб шляхом нанесення покриття з різним ступенем чорноти не цілком ефективно, з часом під дією температури покриття може змінити ступень чорноти. Більш ефективним було б використання обігрівальних труб, виготовлених з алюмінію з хімічним чорнінням потрібних ділянок таким чином, щоб теплонадходження від кожного сегмента обігрівальних труб були б однаковими. При такому підході є певні переваги – наприклад, зменшення металоємності конструкції на 370 кг за рахунок замінювання обігрівальних труб круглого перерізу, виготовлених зі сталі, на плоско-овальні, виготовлені з алюмінію, що збільшує теплопередавальну поверхню, крім того, не має потреби фарбувати обігрівальні труби при проведенні ремонтів.

Для підтвердження теоретичних досліджень за різницею температур теплоносія на вході і виході розвідних труб на базі пасажирських вагонів пасажирського вагонного депо «Львів» – ПКВЧД-8 автором були проведені експериментальні виміри температурних полів, що формуються біля опалювальних приладів, зокрема температури самих опалювальних приладів у пасажирських вагонах. Хоча конструктивно передбачена теплоізоляція розвідних труб, але, як показали теоретичні дослідження, при циркуляції теплоносія через ці труби певна кількість тепла передається у вагон.

Експериментальні виміри включали в себе вимірювання температури опалювальних приладів та внутрішнього обладнання вагона, а саме: визначалася температура на виході з комбінованого котла, температура розвідних труб посередині та в кінці вагона, у точці, де розвідні труби приєднуються до стояків, крім того температура внутрішніх перегородок і декоративної стелі. Виміри проводилися в 10 вагонах: у 5 – купейного типу і в 5 – відкритого типу (плацкартних), теплограми вимірів одного з вагонів для прикладу наведено на рис. 7.

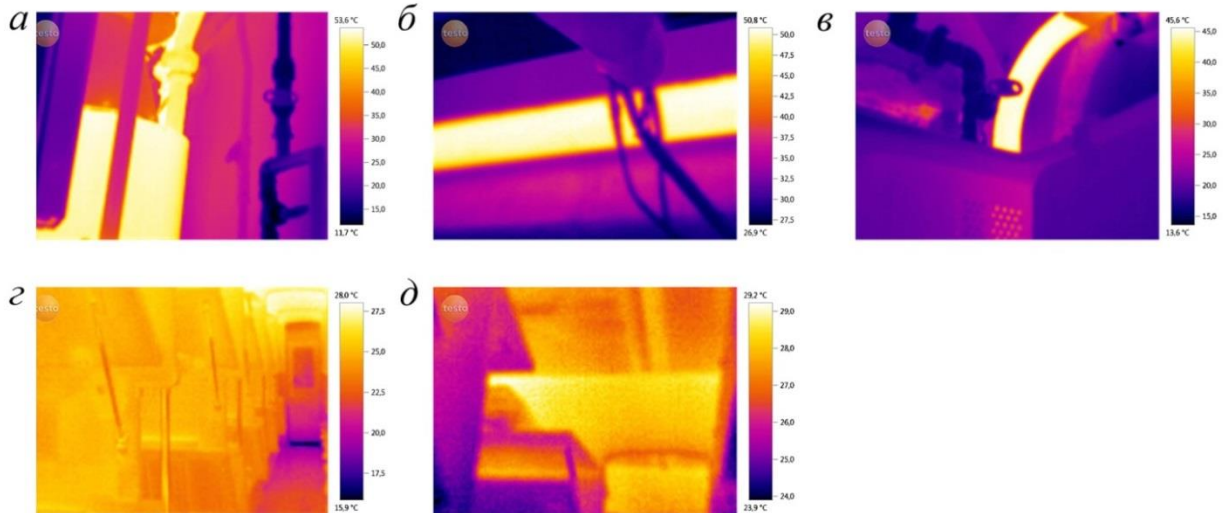


Рисунок 7 – Теплограми вимірів у плацкартному вагоні (заводський № 036-21026); елементи плацкартного вагона:

а – котел, *б* – розвідна труба посередині вагона, *в* – стояк у його верхній частині, *г* – перегородки, *д* – декоративна стеля

Проведений аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень свідчить, що температура теплоносія в розвідній трубі знижується в купейному вагоні в середньому на 3,7 °С, у плацкартному – на 5,9 °С.

Із урахуванням абсолютної похибки вимірювання приладу, яка складає 2,0 % від вимірюваної температури, у температурному еквіваленті похибка становить 0,9 °С; таким чином, результати теоретичних досліджень повністю підтверджують результати експериментальних досліджень.

У п'ятому розділі проведено оцінку економічної ефективності запропонованих технічних рішень для систем опалення пасажирського вагона. У розрахунках економічний ефект від використання модернізованих систем опалення та вентиляції пасажирського вагона залізничного транспорту досягається за рахунок підвищення енергоефективності виробничої діяльності. Його результатами є скорочення витрат на підтримання мікроклімату в пасажирських вагонах.

Економічний ефект розрахований на 14 років, виходячи з того, що модернізація проводиться при виконанні капітально-відновлюваного ремонту з продовженням терміну служби.

Термін окупності капіталовкладень (за всіма разом запропонованими рішеннями з вдосконалення) складає 4 роки. Сумарний економічний ефект за весь період експлуатації (14 років) за всіма разом запропонованими рішеннями вдосконалення для одного вагона становить 237,51 тис. грн, а для експлуатаційного парку, який станом на 2018 рік становить 2 366 пасажирських вагонів – на загальну суму 561,948 млн. грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі викладених теоретичних і експериментальних досліджень вирішене актуальне наукове завдання з вдосконалення функціонування систем опалення та вентиляції пасажирських вагонів шляхом математичного експерименту на базі імітаційної моделі, яка відтворює теплову масу, втрати тепла через огорожувальні конструкції та роботу систем опалення та вентиляції в поєднанні з експериментальними дослідженнями і узагальненням отриманих результатів для об'єкта в цілому. Основні наукові результати, висновки і практичні рекомендації полягають в наступному.

1. Аналіз існуючого технічного стану систем життєзабезпечення пасажирських вагонів, які знаходяться в експлуатації, показав, що переважна більшість вагонів пасажирського парку Укрзалізниці обладнана водяними системами опалення, які не в повній мірі забезпечують сучасні вимоги комфорту. В умовах реформування пасажирського господарства, при істотному зносі рухомого складу і недоліках інфраструктури в цілому, відмова від водяної системи опалення з комбінованим котлом для пасажирських вагонів на теперішній час не можлива.

2. Виконано огляд наукових публікацій, спрямованих на вдосконалення систем життєзабезпечення. Встановлено, що поряд з порівняно великими обсягами досліджень із вдосконалення конструкції систем життєзабезпечення пасажирських вагонів завдання підвищення ефективності функціонування систем опалення і вентиляції не висвітлені і вимагають більш ефективних рішень.

3. Розроблено математичну модель нестационарних теплових процесів у пасажирському вагоні з водяною системою опалення, що за рахунок урахування динамічного характеру процесів дозволяє підвищити якість оцінки конструктивних рішень систем життєзабезпечення, досліджувати нестационарність теплового стану в приміщеннях вагона за різних умов експлуатації та здійснювати порівняльний аналіз різних конструктивних рішень систем життєзабезпечення пасажирських вагонів.

4. Розроблені відповідні імітаційні моделі пасажирських вагонів для спеціально розробленої програми моделювання – для проведення комплексного аналізу нестационарних теплових процесів при опаленні пасажирського вагона на будь-якому етапі рейсу (модель було уточнено за допомогою результатів експериментів, проведених автором, враховуючи зокрема й тепловиділення від пасажирів). Вихідні дані для кожної моделі склалися з геометричних та фізичних характеристик вагона, враховувалися параметри систем життєзабезпечення, включаючи можливість здійснення керування ними, внутрішні припливи тепла та параметри зовнішнього середовища (температура повітря, швидкість та напрямок вітру, швидкість руху).

5. Виконані теоретичні та експериментальні дослідження факторів, що впливають на ефективність процесу формування параметрів мікроклімату в пасажирському рухомому складі. Отримані залежності параметрів мікроклімату в пасажирському вагоні локомотивної тяги залежно від авторитету параметрів у теплових контурах систем опалення і вентиляції, що передбачає практичну реалізацію в конструктивних рішеннях. Визначені місця теплових витрат в тепловому балансі внутрішніх приміщень, зокрема були виділені зони окремих температурних полів усередині вагона, які розділені декоративною стелею. Отримано комплексну залежність параметрів мікроклімату в приміщеннях пасажирського вагона локомотивної тяги від величини повітрообміну, обсягу інфільтрації та кількості пасажирів у вагоні.

6. На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблені технічні рішення з підвищення енергоефективності систем життєзабезпечення для існуючих конструкцій пасажирських вагонів, які не потребують значних витрат.

Запропоновані технічні рішення з підвищення енергоефективності систем опалення і вентиляції легко реалізуються і не потребують значних інвестицій; енергоефективність від їх впровадження складає 27,4 %, зменшує металоємність конструкції на 370 кг, це дає підстави для зниження потужності системи опалення щонайменше на 25 %, що сприятиме зниженню металоємності системи опалення, а в цілому зменшує тару вагона. Крім того, завдяки зниженню потужності системи опалення знизиться потужність високовольтного обладнання: головного роз'єднувача, контакторів, запобіжників; зменшиться поперечний переріз дротів і кількість електронагрівальних ТЕНів.

7. Обґрунтована доцільність використання запропонованих технічних рішень з вдосконалення систем опалення і вентиляції пасажирських вагонів. Економічний ефект від використання запропонованих технічних рішень з вдосконалення систем опалення і вентиляції для одного вагона за весь період експлуатації (14 років) становить 237,51 тис. грн. Експлуатаційний парк пасажирських вагонів на 2018 рік складає 2 366 вагонів (на загальну суму 561,948 млн. грн).

8. Результати виконання дисертаційних досліджень впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна (акт впровадження від 10.09.2018 р.). Впроваджені у ПКТБ з проектування і модернізації рухомого складу, колії та штучних споруд Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна (акт впровадження від 17.09.2018 р.). Впроваджені у виробництво в пасажирському депо «Львів» ПКВЧД–8 Пасажирської компанії АТ «Укрзалізниця» (акт впровадження від 12.10.2018 р.).

Основні положення і результати дисертації опубліковано

– у закордонних наукових фахових виданнях:

1. Белошицкий Э. В., Мямлин С. С. Усовершенствования функционирования систем отопления пассажирских вагонов. *Известия ПГУПС*, 2018. № 2. С. 271–279.

– у наукових фахових виданнях, затверджених МОН України, що входять до наукометричних баз даних:

2. Biloshytskyi E. V. Ways to manage heating inertia. *Наука та прогрес транспорту*, 2017. № 4 (70). С. 106–116. DOI: 10.15802/stp2017/109632.

3. Белошицкий Э. В., Мямлин С. С. Пути усовершенствования систем водяного отопления пассажирских вагонов. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2017. № 174. С. 50–60.

4. Biloshytskyi E. V. Mathematical model of unsteady heat transfer of passenger car with heating system. *Наука та прогрес транспорту*, 2018. № 1 (73). С. 121–130. DOI: 10.15802/stp2018/123409.

5. Білошицький Е. В. Енергоефективність систем життєзабезпечення рухомого складу залізниць. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2018. № 179. С. 13–25. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.179.2018.147709>

– *тези доповідей та матеріали міжнародних наукових конференцій:*

6. Белошицкий Э. В. Регулируемый воздухообмен и энергосбережение. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: материалы 75-й Международной научно-практической конференции*. (Днепропетровск, 14–15 мая 2015 г.). Днепропетровск, 2015. С. 59.

7. Белошицкий Э. В. Усовершенствование отопительных систем пассажирских вагонов. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: материалы 75-й Международной научно-практической конференции*. (Днепропетровск, 14–15 мая 2015 г.). Днепропетровск, 2015. С. 73.

8. Белошицкий Э. В. Регулирование мощности водяного калорифера. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: материалы 76-й Международной научно-практической конференции*. (Днепропетровск, 19–20 мая 2016 г.). Днепропетровск, 2016. С. 39.

9. Белошицкий Э. В. Пути усовершенствования систем водяного отопления пассажирских вагонов. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: материалы 77-й Международной научно-практической конференции* (Днепр, 11–12 мая 2017 г.). Днепр, 2017. С. 36–37.

10. Белошицкий Э. В. Способы управления инертностью водяного отопления. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: материалы 77-й Международной научно-практической конференции*. (Днепр, 11–12 мая 2017 г.). Днепр, 2017. С. 43–44.

11. Белошицкий Э. В., Кебал И. Ю. Качественное регулирование мощности отопительных приборов системы отопления пассажирских вагонов. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: материалы 77-й Международной научно-практической конференции*. (Днепр, 11–12 мая 2017 г.). Днепр, 2017. С. 45.

12. Белошицкий Е. В., Мямлін С. С. Удосконалення параметрів енергоефективності систем життєзабезпечення рухомого складу залізниць. *Сучасні методики, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. (Радом, Республіка Польща, 27–28 грудня 2017 р.). Радом, Республіка Польща, 2017. С. 140–144.

13. Білошицький Е. В. Визначення місць теплових втрат в пасажирських вагонах. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. (Дніпро, 17–18 травня 2018 р.). Дніпро, 2018. С. 28–30.

14. Білошицький Е. В. Експериментальне дослідження керування тепловіддачею опалювальних труб за рахунок вільної конвекції. *Основні проблеми освіти і науки: перспективи розвитку для України та Польщі: матеріали Міжнародної багатопрофільної конференції.* (Стальова Воля, Республіка Польща, 20–21 липня 2018 р.). Стальова Воля, Республіка Польща, 2018. Том 6. С. 76–78.

– *які додатково відображають наукові результати дисертації:*

15. Опалювальна система пасажирського вагона: пат. 115667 Україна, В61D 27/00. Кебал Ю. В., Білошицький Е. В., Мямлін С. С. № u201610911; заявл. 31.10.2016; опубл. 25.04.2017. Бюл. № 8. 4 с.

16. Опалювальна система пасажирського вагона Пат. 116042 Україна, В61D 27/00. Мямлін С. В., Кебал Ю. В., Дуганов О. Г., Поух Е. Ф., Білошицький Е. В. № u201610204; заявл. 07.10.2016 опубл. 10.05.2017. Бюл. № 9. 4 с.

17. Белошицкий Э. В., Кебал Ю. В. Повышение эффективности отопительно-вентиляционных систем. *Вагонный парк*, 2017. № 1–2 (118–119). С. 32–35.

АНОТАЦІЯ

Білошицький Е. В. Удосконалення функціонування систем опалення та вентиляції пасажирських вагонів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів (Галузь знань 27 – Транспорт). – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2019.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального наукового завдання з удосконалення функціонування систем опалення та вентиляції пасажирських вагонів шляхом розробки наукових основ вибору оптимізаційних заходів для систем життєзабезпечення та апаратного забезпечення з підвищенням енергоефективності цих систем, без зниження якості мікроклімату в пасажирських вагонах.

Теоретично і експериментально досліджено фактори, що впливають на ефективність процесу формування параметрів мікроклімату в пасажирському рухомому складі. Визначено методи підвищення ефективності й енергоефективності, котрі можна реалізувати на існуючих конструкціях пасажирських вагонів.

Запропоновані рішення з вдосконалення систем опалення підвищують енергоефективність системи опалення на 27,4 %. Це дає підстави для зниження потужності системи опалення щонайменше на 25 %.

Економічний ефект від запропонованих рішень вдосконалення за період експлуатації (14 років) для експлуатаційного парку пасажирських вагонів складатиме 561,948 млн. грн.

Ключові слова: система опалення, енергоефективність, експериментальні виміри, математичне моделювання, пасажирський вагон, природна циркуляція, тепловіддача, нестационарні теплові процеси

АННОТАЦИЯ

Белошицкий Э. В. Совершенствование функционирования систем отопления и вентиляции пассажирских вагонов. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.22.07 - Подвижной состав железных дорог и тяга поездов (Область знаний 27 - Транспорт). - Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепр, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи по совершенствованию функционирования систем отопления и вентиляции пассажирских вагонов путем разработки научных основ выбора оптимизационных мероприятий для систем жизнеобеспечения и аппаратного обеспечения с повышением энергоэффективности этих систем, без снижения качества микроклимата в пассажирских вагонах.

Теоретически и экспериментально исследованы факторы, влияющие на эффективность процесса формирования параметров микроклимата в пассажирском подвижном составе. Определены методы повышения эффективности и энергоэффективности, которые можно реализовать на существующих конструкциях пассажирских вагонов.

Предлагаемые решения по совершенствованию систем отопления повышают энергоэффективность системы отопления на 27,4%. Это дает основания для снижения мощности системы отопления минимум на 25%.

Экономический эффект от предложенных решений совершенствования за период эксплуатации (14 лет) для эксплуатационного парка пассажирских вагонов составляет 561,948 млн. грн.

Ключевые слова: система отопления, энергоэффективность, экспериментальные измерения, математическое моделирование, пассажирский вагон, естественная циркуляция, теплоотдача, нестационарные тепловые процессы

ABSTRACT

Biloshytskyi E.V. Improvement of the operation of heating and ventilation systems for passenger carriages. – Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.22.07 – Rolling stock of railways and traction of trains (Branch of knowledge 27 – Transport) – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2019.

The dissertation is devoted to improvement of functioning of systems of heating and ventilation of passenger carriages by developing scientific bases the choice of optimization measures for life support systems and hardware with increased energy efficiency of these systems, without reducing the quality of microclimate in passenger carriages.

Flaws, systems of heating of passenger carriages are determined, which have two fundamental disadvantages: firstly, the lack of proper automation of work in order to maintain a stable temperature regime in wagons. Secondly, the low rate of natural circulation of water in the heating pipes there is a decrease in the heat output of the heating devices, which is exacerbated by another factor – uneven heat dissipation of heating pipes. Lack of proper interaction of ventilation and heating systems, as a result, unsatisfactory use of the ventilation system of a passenger carriage. Constructions of heating systems of a passenger fleet of wagons substantiated in the 70's and 80's of the last century, when the problem of providing normalized microclimate parameters mainly solved by increasing the capacity of heating appliances.

The mathematical model is developed of non-stationary thermal mode of a passenger carriage with water heating system to evaluate the role of non-stationary, transitional tem-

perature states in passenger carriage, selection of optimal technical characteristics of heating devices and building an algorithm for managing their work according to operating conditions, including in view of the thermal inertia of the carriage at transitional operating modes of the heating system.

Developed models of passenger carriages in the written modeling program, for complex analyzes of non-stationary thermal processes at the heating of a passenger carriage at any stage of the flight.

The factors influencing the efficiency of the process are investigated theoretically and experimentally formation of parameters of the microclimate in the passenger rolling stock. On the basis of research, which are performed using the simulation model of the wagon taking into account physically substantiated and experimentally confirmed features thermal condition of the carriage during operation, (recreated energy flows of the energy balance of passenger carriage) proposed scientifically-based methods for improving effectiveness and energy efficiency of life support systems functioning, without reducing the quality of the microclimate of passenger carriages.

The most valid methods of increasing efficiency and energy efficiency are determined, which can be realized on existing constructions of passenger carriages and which do not require significant expenses.

Supply of coolant to the heating pipes on separate risers, which allows you to refuse the use of a circulating pump.

The use of combined insulation, which reduces the heat output of the dilution pipes to 75% and allows to increase the energy efficiency of the heating system by 13.4%.

Integration of CO₂ sensors together with the automation of the operation of the calorifier allow to maintain the desired temperature of outside air, supplied by the ventilation system, reduces thermal energy for heating the outside air by 10%.

Ensure uniform heating of heat pipes due to changes in the intensity of radiation heat transfer from the surface of the heating pipes by installing flat-oval heating pipes are made of aluminum using the chemical blackening of the desired sites in such a way, so that heat from each heating pipe segment would be the same.

This method provides a uniform temperature regime along the length of the carriage, reduces metal construction for 370 kg, and reduces the costs of heat energy by 4.8%.

Control of heat transfer of heating pipes at the expense of free convection regulatory casings allows to reduce the influence of the thermal inertia of the heating system on the temperature mode in the carriage and reduces heat loss by 4.6%.

The proposed methods for improving heating systems are easily implemented and do not require significant investment; energy efficiency of their implementation is 27.4%, this gives grounds for reducing the power of the heating system by at least 25%.

The economic effect of each of the proposed improvement solutions for one carriage in the period of operation (14 years) is 237,51 thousand UAH, and an operational fleet of passenger carriages (projected for 2018) will make 2 366 wagons, thus for the passenger fleet of passenger carriages the total economic effect will amount to UAH 561,948 million.

Keywords: heating system, energy efficiency, experimental measurements, mathematical modeling, passenger carriage, natural circulation, heat transfer, non-stationary thermal processes

БІЛОШИЦЬКИЙ ЕДУАРД ВАСИЛЬОВИЧ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ТА
ВЕНТИЛЯЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ**

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку «12» «лютого» 2019

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 0,9.
Обл. вид. арк. 1.0. Тираж 100 прим.

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003.

Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:
Дніпро, вул. Лазаряна, 2, 49010

