



УДК. 629

THERMAL PROCESSES IN VENTILATED DISC BRAKES AND THEIR SIMULATION IN TYPE II TESTS**ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ У ВЕНТИЛЬОВАНИХ ДИСКОВИХ ГАЛЬМАХ ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ НА ВИПРОБОВУВАННЯХ ТИПУ II****Zakhara I. Y./ Захара І. Я.***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0001-6214-6548

Kozak F. V./ Козак Ф. В.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0002-9147-883X

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas**15 Karpatska St, 76019**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**вул. Карпатська 15, 76019*

Анотація. Сучасні автотransпортні засоби (АТЗ) характеризуються тим, що в них постійно покращуються експлуатаційні властивості, які забезпечують підвищення їх продуктивності та пропускної здатності автомобільних доріг внаслідок збільшення середньої швидкості руху. В наслідок чого виникає необхідність у вирішенні великої кількості задач математичної фізики, які мають практичне значення. Одним із найскладнішим для дослідження, вважаються динамічні процеси в системах з розподіленими параметрами.

Існує ціла низка проблем, що потребують розв'язку задач тепломасового переносу. Одна із них, це охолодження гальмових пристроїв, з метою підвищення ефективності роботи гальмівної системи АТЗ в цілому. Розв'язок даної задачі вимагає визначення температурних полів в конструкціях складного профілю з різними за координатами теплофізичними коефіцієнтами, які залежать від температури.

Актуальним постає питання дослідження впливу робочої температури на режим роботи вентильованих дискових гальмових механізмів АТЗ в умовах їх високої енергонавантаженості, які притаманні тривалими гальмуваннями (гірські умови).

Завдяки останнім дослідженням значно розширені можливості розв'язку задач теплопереносу на ПК, алгоритмів розв'язку і технічних засобів, які сприяють вирішенню вище означених задач.

Ключові слова: автотransпортний засіб, гальмівний механізм, вентильовані диски, випробування II, математичне моделювання, теплові моделі.

Вступ.

Серед експлуатаційних властивостей автотransпортних засобів (АТЗ), що забезпечують безпеку дорожнього руху велику роль відіграє гальмівна система. Найбільш нестабільну ланку гальмівної системи становить гальмовий механізм. У зв'язку з цим покращення гальмівних властивостей АТЗ та збереження їх експлуатаційних характеристик на протязі всього терміну служби є особливо актуальним. Наявність на автомобілях надійної та високоефективної гальмівної системи забезпечує підвищення безпеки руху та створює умови для більш ефективного використання тягово-швидкісних можливостей.

Тому вдосконалення теорії робочих процесів, конструкцій та дослідження режимів роботи гальмових механізмів з метою мінімізації їх температурного режиму і підвищення надійності є одним з актуальних завдань.



Матеріали досліджень.

У вивченні теплового стану складних підсистем, до яких відносять гальмові механізми, формулювання простих законів теплопереносу поки що неможливе, і замінюється побудовою ескізних моделей. Це не означає, що нехтується категорія закону, а додатково до відомих теоретичних і традиційних експериментальних досліджень на сучасному етапі залучається математичне моделювання. Відбувається заміна закону моделлю та з'являється новий вид експерименту (машинний експеримент), який дозволяє розглянути безліч варіантів різних моделей на ПК із подальшим порівнянням результатів досліджень з вибірковим реальним експериментом.

В процесі розв'язку задач теплопереносу в складних геометричних деталях використовують відповідні програмні комплекси [1], з допомогою яких комп'ютерним моделюванням імітуються теплові процеси у фізичних об'єктах. До складу програмних комплексів здебільшого входять спеціальні інтегральні оболонки та комплекси розрахункових модулів. Зазначений програмний комплекс не складний і доступний у використанні як початківцям дослідникам, так і інженерно – експлуатаційному персоналу. Він розв'язує дво – чи тривимірні задачі теплопереносу у діалоговому режимі, що дає змогу отримувати одразу результат.

Комплекс передбачає, після входу у його оболонку, задавання відповідної кількості вузлів у досліджуваному об'єкті та встановлення розрахункового модуля, яким визначається клас розв'язуваної задачі. Викреслюється потрібна конфігурація досліджуваного фізичного тіла, задають відповідні умови однозначності у спеціальних таблицях скалярів та векторів, які будуть застосовуватись під час моделювання на дисплей комп'ютера. Ще одна із переваг – дослідник має можливість вибору із наборів багатьох кінцево-різницевого методів оптимальний, який, залежно від змісту задачі може бути або з мінімальною тривалістю розв'язку, або найточнішим чи найпростішим.

Комплекс дозволяє змінювати умови однозначності, вносити корективи у конфігурацію досліджуваної ділянки об'єкта, змінювати кроки фіксованих теплових станів за часом і простором, а також емпіричні коефіцієнти у визначених межах і методи розв'язування задач. Отримані результати можна контролювати на дисплеї після кожної ітерації або ж кроку встановленого інтервалу часу тривання теплового процесу. Результати подаються у вигляді як теплових полів об'єкта, так і відповідних числових значень температур у кожному його вузлі. Кожен етап моделювання вноситься у пам'ять і за потреби він може бути продовжений або закінчений, якщо отримано шуканий результат.

Розроблений розрахунковий модуль для дослідження температурних полів у дискових гальмових механізмах під час їхньої роботи на режимах притаманні тривалими гальмуваннями (гірські умови) [2]. В модулі процес теплообміну розроблений у двовимірній постановці, де обертання колеса імітується переміщенням гальмової накладки по диску (переміщенням джерела тепловиділення) і автоматично реалізується програмою математичного модуля.

У процесі розв'язку через проміжок часу, що визначає чверть обороту колеса, що, у свою чергу, залежить від швидкості руху, джерело тепловиділення



зміщається на один квадрант проти ходу обертання.

Основним завданням інтервалів часу визначається частотою обертів колеса у секунду. Крок за часом $\Delta \tau$ повинен відповідати часові, через який здійснюється чверть оберту колеса. Проміжок часу τ визначається кількістю обертів колеса, що потрібно здійснити для виміру температури.

Отже, під час моделювання значення температури можливо визначати через чверть оберту колеса або будь-який проміжок часу при гальмуванні та охолодженні.

Програмою передбачено:

- задавання з кута масиву коефіцієнтів теплопровідності λ по всьому масиву;
- задавання λ з першого стовпця масиву за рядками;
- задавання з кута масиву об'ємної теплоємності $c\rho$ по всьому масиву;
- задавання $c\rho$ з першого стовпця масиву за рядками.

Початкові умови заносяться в програму окремо в кожен вузол масиву. А також, для зручності, програмою передбачено, що початкові умови можна занести ще за двома варіантами. У випадку однорідного розподілу температур автоматично заносити їх по всьому масиві з верхнього кута масиву температур. У випадку неоднорідного початкового розподілу температур робити завдання температур за рядками масиву з першого стовпця масиву температур.

Для граничних умов першого роду потрібно задати розподіл температур на межі області F у будь-який момент часу τ :

$$T_{F,\tau} = T(x, y, z, \tau), \text{ або } T_{F,\tau} = const.$$

Програмою моделювання передбачено задання температури та її фіксування для будь-якого вузла області F . Температура задається за рядками з першого стовпця масиву температур і фіксується у потрібних вузлах. Якщо у вузлах моделі з граничними умовами першого роду, для яких фіксування температур не передбачено, вони (значення температур) вилучаються з пам'яті комп'ютера.

Для граничних умов другого роду потрібно задаватися густиною теплового потоку, яка є змінною за часом τ .

$$Q_{F\tau} = Q_{F,\tau}(x, y, z, \tau), \text{ або } Q_{F\tau} = const.$$

Завдання інтенсивності теплового потоку здійснюється за рядками, починаючи з першого стовпця масивів теплових потоків. Під час моделювання процесу теплопередачі густина теплового потоку задається автоматично по вузлах, які імітують робочу поверхню тертя дискового гальма. Якщо гальмо охолоджене, значення теплоти в усіх вузлах теплової моделі нульове.

Процес теплопередачі передбачає завдання (з усього масиву за рядками) температур середовища та коефіцієнта тепловіддачі. Процес же охолодження характеризується у моделі граничними умовами третього роду.

Нестационарний температурний режим гальм, який на сітковій моделі характеризується різними температурними полями, імітується таким чином. Спочатку у таблицю розподілу температур заносяться їх значення, відтак у цю ж таблицю вводяться температури заданих граничних умов 1-го роду. Ці граничні умови обов'язково фіксуються.



В окрему таблицю температур середовища заносяться їх значення, при цьому для заданих граничних умов 3-го роду. У ще одну таблицю вводять значення коефіцієнта тепловіддачі для початкового моменту часу випробувань.

Для граничних умов 2-го роду, яким відповідає відповідна кількість теплоти Q із відповідними значеннями густини теплового потоку на початковий момент часу також формуються їх відповідні масиви і заносяться у таблицю джерел теплоти.

Після цього з використанням програмного комплексу розраховуються температури для кожного наступного моменту часу. Аналогічним чином розрахунковий цикл повторюється n -ну кількість разів з відповідними часовими кроками. Кожний наступний часовий крок починається з автоматичного занесення у таблицю початкового розподілу температур відповідних їх значень, які відповідають температурам у вузлах теплової моделі у $(n-1)$ -й момент часу. У цю ж таблицю можуть заноситися (з фіксацією) температури поверхонь у n -й момент часу, які відповідають граничним умовам 1-го роду.

Так само автоматично вводяться у відповідній таблиці температури середовища, коефіцієнт тепловіддачі у n -й момент часу для граничних умов 3-го роду. Для граничних умов 2-го роду у таблицю джерел теплоти заносяться значення густини теплового потоку для цього ж n -го моменту часу.

Отже, на підставі граничних умов, які визначаються коефіцієнтом тепловіддачі, температурою у вузлах моделі та інтенсивністю теплового потоку, для кожного n -го моменту часу і температурних полів в конструкції механізму в $(n-1)$ -й момент часу, визначають температуру тіла в n -й момент часу.

Встановлено, що на початку моделювання теплопереносу на температурне поле тіла впливає початковий його розподіл. Через відповідний інтервал часу постійного гальмування первинний розподіл температур змінюється і настає новий розподіл уже на початку процесу охолодження диска. Цей новий розподіл температур фіксується як розв'язок на відповідному етапі моделювання. Наприкінці процесу охолодження елементів дискового гальма здійснюється знову перерозподіл температур, які для повторного гальмування будуть фіксуватися як початкові умови.

Зважаючи на те, що розв'язування задачі стосується дискретних величин у просторі та часі, то на кожному кроці можна вносити відповідні корективи залежно від зміни координат, температури і часу щодо граничних умов, джерел теплоти та непостійності і нелінійності теплофізичних характеристик матеріалів пар тертя. Граничні умови визначають інтенсивність теплових потоків, коефіцієнт теплообміну та зміни допустимих меж температури у зоні тертя. У разі, якщо враховується тенденція нелінійності і залежності від координат та часу тих величин, що входять у математичну модель, то вони вводяться у ці залежності відповідними методами, виходячи із фізичного змісту задачі, яка розв'язується. Створена на підставі обґрунтованого методу теплова модель дискового гальма АТЗ перевірена на адекватність [3] за результатами аналітичного розв'язку рівняння теплопровідності [4, 5] при екстремому гальмуванні, коли тепловіддачею можна знехтувати із-за короткої тривалості процесу (3сек)



В описаному вище математичному модулі програмного комплексу застосована двовимірна сітка термічних опорів. Програма забезпечує автоматичний розрахунок опорів сітки з різними, але постійними кроками по координатах x , y і дає можливість враховувати розмір z тільки по всій сітці. Тому програма не дозволяє моделювати температурні поля одночасно в диску і накладці гальмового механізму.

З огляду на це у випадку дискових гальмових механізмів тривимірні процеси теплопровідності в них можна описати двовимірною системою диференціальних рівнянь з корекцією теплофізичних коефіцієнтів і граничних умов від координати z .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_d(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_d(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q(x, y, z) = c_d \rho_d(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_n(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_n(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q(x, y, z) = c_n \rho_n(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial \tau}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_k(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_k(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = c_k \rho_k(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (3)$$

Якщо прийняти, що теплофізичні коефіцієнти деталей гальмових механізмів λ і $c\rho$ слабо залежать від температури і їх можна вважати постійними, то система рівнянь (2.31)–(2.33) перетворюється в систему лінійних рівнянь теплопровідності.

Двовимірна система лінійних диференціальних рівнянь з корекцією теплофізичних коефіцієнтів і граничних умов від координати z має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_d(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_d(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q(x, y, z) = c_d \rho_d(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial \tau}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_n(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_n(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q(x, y, z) = c_n \rho_n(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial \tau}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_k(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_k(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = c_k \rho_k(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (6)$$

Для розв'язку зазначених задач на цій двовимірній сітці розроблена відповідна методика моделювання [4]. По координаті z буде моделюватися сектор гальмового диска, накладки і колодки (рисунок 1).

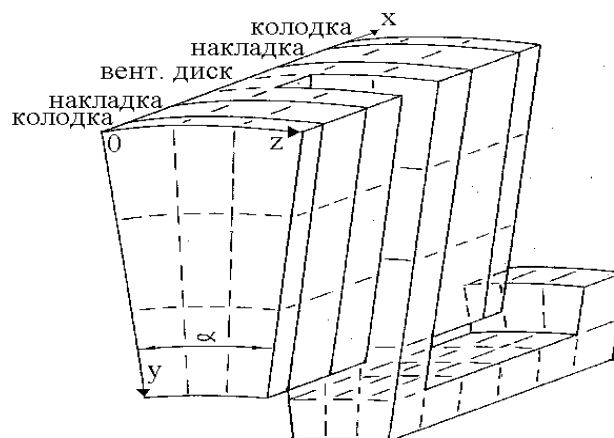


Рисунок 1- Сектор тривимірної моделі дискового гальма з вентиляльованим ДИСКОМ



Як показали дослідження [6], похибка при переході від тривимірної до двовимірної сітки не перевищує 2%.

Тому з цією метою на двовимірній сітці (рисунок 2) за координатою Z моделюється наведений вище сектор гальма. При цьому зміни середньої товщини сектора за координатою Y з кроком ΔY враховуються зміною теплофізичних коефіцієнтів для кожного горизонтального рядка сітки. Перший горизонтальний рядок буде відповідати встановленим крокам за простором X, Y, Z , і в нього задаються дійсні теплофізичні коефіцієнти. В наступних рядках їх значення визначають відповідно до зміни середньої товщини за координатою Z залежно від просторового кроку за координатою Y .

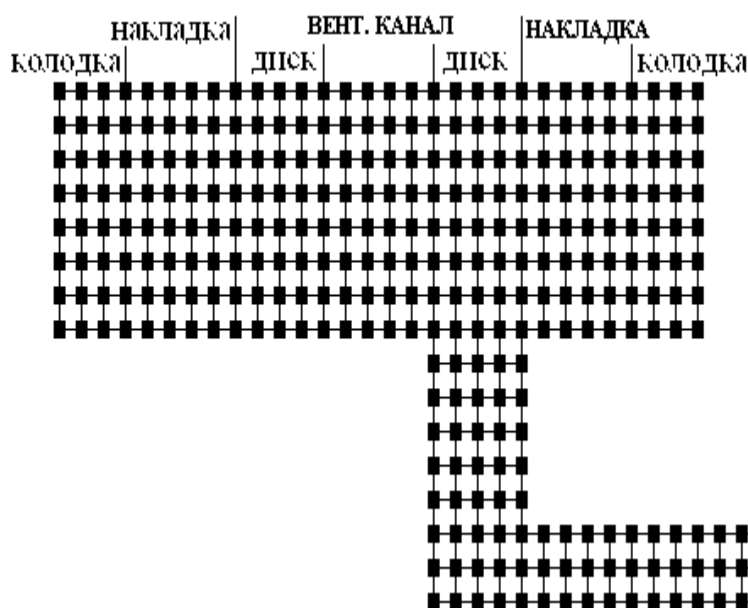


Рисунок 2 - Сіткова модель вентилязованого дискового гальма

В математичному модулі використовується прямокутна система координат, в якій допускається різна дискретизація за координатами X, Y, Z . Крок за координатами рівний $\Delta X = 0,004$ м; $\Delta Y = 0,01$ м; $\Delta Z = 0,02$ м. Задаємо однорідний початковий розподіл температур $T = 20^{\circ}\text{C}$. З першого стовпчика масивів теплофізичних коефіцієнтів на кожний рядок вузлів пропорційно дійсним площам задаються їх значення.

Після цього конфігуратором змінюється конфігурація моделі, прототипом якої служить передній гальмовий механізм автобуса А 172. [7]

На ділянці пояса тертя в моделі гальма змінюють пропорційно дійсним площам значення коефіцієнта теплопровідності, а на границях моделі таким самим чином задають значення граничних умов третього роду.

Особливістю моделювання вентиляційних каналів є зменшення значення об'ємної теплоємності та теплопровідності у 3,2 рази в об'ємі перегородок диска по товщині вентиляційного каналу. На стінки каналів задаються граничні умови третього роду, тобто значення коефіцієнтів тепловіддачі α (рисунок 3).

До недоліків методу математичного моделювання можна віднести наступне:

– достовірність розрахункових результатів залежить від повноти і точності початкових даних і достовірності прийнятих припущень;



- для прискорення розрахункових досліджень часто приймаються спрощені моделі, що знижує точність розрахунків;
- в багатьох випадках необхідні попередні експериментальні дані.

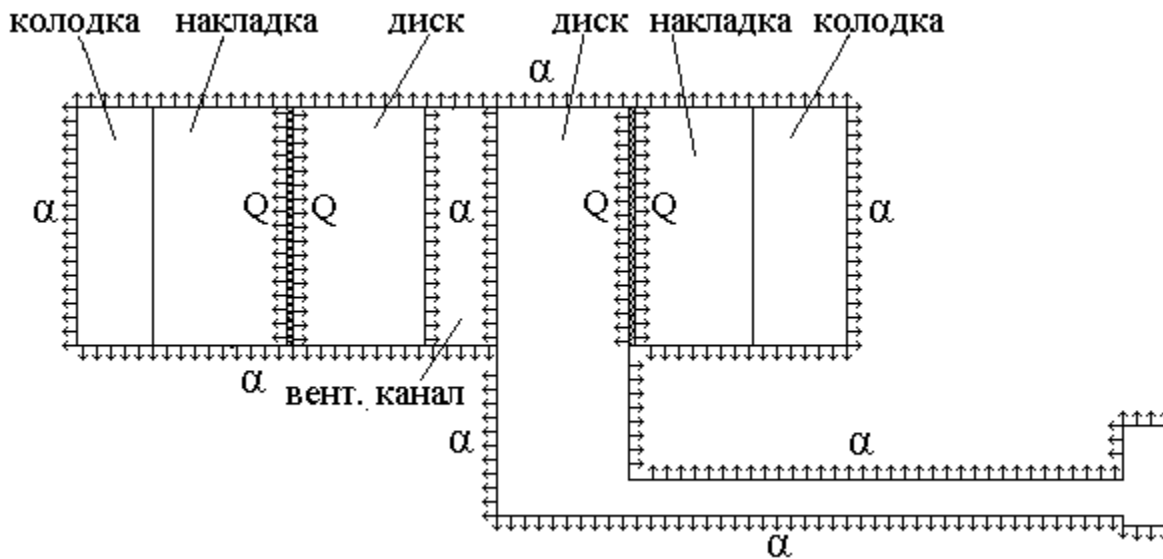


Рисунок 3 - Завдання граничних умов на моделі вентилязованого дискового гальма

До такого випадку якраз відноситься отримання достовірних граничних умов третього роду, тобто умов тепловіддачі від дискових гальм, що можна одержати під час дорожніх випробувань АТЗ.

Висновки

1. Виявлено переваги та недоліки методів математичного моделювання. Обґрунтовано вибрано метод кінцевих різниць для дослідження температурних режимів гальм із-за можливості використання сучасного програмного забезпечення та швидкодіючих комп'ютерів.
2. Моделювання теплових процесів дозволить ще на етапі конструювання визначити параметри робочих елементів гальмового механізму АТЗ.
3. Створена методика моделювання теплових процесів у вентилязованих гальмових механізмах з врахуванням тривимірності та завдання граничних умов у вентиляційних каналах диска.
4. Оскільки для завдання вірогідних значень коефіцієнтів тепловіддачі α від вентилязованих дискових гальм, необхідно ідентифікувати α математичним моделюванням за результатами дорожніх випробувань автобуса. Для цього необхідно створити вимірювальний комплекс гальмівних властивостей АТЗ.

Література:

1. Тарапон А.Г. Программный комплекс для моделирования процессов теплопереноса при аварийных ситуациях // Методы и средства компьютерного моделирования. Сб. / Тарапон А.Г., Сорокин Н.А., Тернавський В.О. – К.: Изд-во ИПМЭ НАНУ, 1997. – С. 58–60.
2. Гудз Г.С., Коляса О.Л., Тарапон А.Г. Расчетный модуль для исследования температурных полей в дисковых тормозах автотранспортных средств // Зб.



наук. праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАНУ „Моделювання та інформаційні технології». / Гудз Г.С., Коляса О.Л., Тарапон А.Г. – Київ, 2001, вип. 8. – С. 45–50.

3. Коляса О.Л. Обґрунтування теплової моделі дискових гальмових механізмів автомобільних коліс: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.02 "автомобілі та трактори" / О.Л. Коляса. – Львів, 2002. – 19 с.

4. Limpert R. An investigation on thermal conditions leading to surface rupture of cast iron rotors // SAE Paper 720447, 1972. – P. 1–14.

5. Morgan S., A theoretical prediction of disk brake temperatures and a comparison with experimental data. SAE Preprints, № 720090, / Morgan S., Dennis R. 1972.– P. 67–80.

6. Осташук М.М. Розроблення методу визначення розподілу теплових потоків в елементах автомобільних дискових гальм на тривимірних моделях: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.02 "автомобілі та трактори" / М. М.Осташук – Львів, 2005. – 19с.

7. Гудз Г.С. Перевірка енергоємності дискових гальм перспективних автобусів / Г.С.Гудз, О.Р.Клипка // Вісн. Донецького ін – ту автомоб. тр – ту. – Донецьк: ДІАТ, 2006. – № 2 – 3. – С.61–68.

References

1. Тарапон А.Н. Программный комплекс для моделирования процессов теплообмена при аварийных ситуациях // Методы и средства компьютерного моделирования. Сб. / Тарапон А.Н., Сорокун Н.А., Тернавский В.О. – К.: Изд-во УРМЭ НАНУ, 1997. – С. 58–60.

2. Hudz H.S., Koliaca O.L., Tarapon A.H. Расчетный модуль для исследования температурных полей в дисковых тормозах автотранспортных средств // Зб. наук. праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАНУ „Моделювання та інформаційні технології». / Hudz H.S., Koliaca O.L., Tarapon A.H. – Kyiv, 2001, вып. 8. – С. 45–50.

3. Koliaca O.L. Обґрунтування теплової моделі дискових гальмових механізмів автомобільних коліс: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.02 "автомобілі та трактори" / О.Л. Koliaca. – Lviv, 2002. – 19 с.

4. Limpert R. An investigation on thermal conditions leading to surface rupture of cast iron rotors // SAE Paper 720447, 1972. – P. 1–14.

5. Morgan S., A theoretical prediction of disk brake temperatures and a comparison with experimental data. SAE Preprints, № 720090, / Morgan S., Dennis R. 1972.– P. 67–80.

6. Ostashuk M.M. Розроблення методу визначення розподілу теплових потоків в елементах автомобільних дискових гальм на тривимірних моделях: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.02 "автомобілі та трактори" / М. М.Осташук – Lviv, 2005. – 19с.

7. Hudz H.S. Перевірка енергоємності дискових гальм перспективних автобусів / H.S.Hudz, O.P.Klypko // Вісн. Донецького ін – ту автомоб. тр – ту. – Донецьк: ДІАТ, 2006. – № 2 – 3. – С.61–68.

Abstract. Braking is a form of motor vehicle (MV) driving that ensures speed reduction and its motionless positioning. The vehicle braking properties are specified by the Regulations No. 13 of the Committee on Internal Transport of the United Nations Economic Commission for Europe. Special interest is generated by the study of the brakes thermal behavior at cycling braking specified by the 2st type tests in accordance with the given regulations.



Until recently, the studies of the brake units thermal behavior were conducted with the help of the methods of single-factor or sequential experiments. The results of such studies are presented in the form of a great variety of diagrams, on the basis of which there are developed criteria dependencies, in accordance with which it is impossible to determine numeric temperature values when reuniting the factors that determine them. Therefore, the issue of development of efficient study methods on the basis of the similarity, modeling, and experiment planning theories becomes topical since these methods provide a possibility to solve a lot of the fundamentally new problems that cannot be resolved with the help of the common classical ones (methods of one of the theories).

Стаття відправлена: 13.11.2023 г.

© Захара І.І.