

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОМОБІЛЬНИХ БАРАБАННИХ ГАЛЬМАХ

**В.В. Волощук, наук. співроб., Український науково-дослідний  
інститут природних газів,  
Д.О. Вольченко, доцент, к.т.н., Івано-Франківський національний  
університет нафти і газу**

***Анотація.** Представлено математичну модель теплових процесів, що відбуваються у барабанних гальмах автотранспортних засобів при їх природному і примусовому охолодженні на типових режимах випробувань, яка базується на дискретизації параметрів рівняння теплового балансу та часовій ітерації.*

***Ключові слова:** барабанні гальма, температура, тепла модель.*

### Вступ

Тепловий стан окремих механізмів, що працюють за умови підвищених робочих навантажень, є визначальним фактором при розробці конструкції, базових параметрів, матеріалів. Це безпосередньо стосується автомобільних барабанних гальм, теплонавантажених яких є значною, а їх працездатність обмежена певним діапазоном температур [1].

### Аналіз публікацій

Серед багатьох методів розв'язання задач теплопровідності до найбільш широко вживаних відносяться: аналітичний, числовий та експериментальний. За допомогою вказаних методів визначають значення температур у досліджуваних об'єктах розрахунковим чи експериментальним шляхом [2]. Недоліком аналітичного методу є неможливість знаходження розв'язку без дискретизації складових рівняння теплопровідності, як наслідок – зниження точності. Проведення експериментальних досліджень у багатьох випадках пов'язане з великими труднощами, що позначається на їх результатах. Числові методи стали широко застосовуватися останнім часом, внаслідок прогресу комп'ютерних технологій.

### Мета та постановка задачі

Мета статті – комплексно дослідити динаміку впливу різних чинників на тепловий стан

гальм на типових режимах випробувань при їх природному та примусовому охолодженні.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі: відтворити математично теплові процеси, що відбуваються в автомобільному барабанному гальмі під час гальмування за допомогою дискретизації параметрів рівняння теплового балансу та часової ітерації; встановити за допомогою теплової моделі вплив складових теплового балансу барабанних гальм на їх теплову навантажених та зміну температурного поля по товщині ободу гальмівного барабана.

### Теплова модель

Щоб розв'язати математичну модель наближеним числовим методом, необхідно її перетворити таким чином, щоб незначною мірою вплинути на точність оцінки теплового стану барабанних гальм, і, водночас, спростити розрахунок шуканих параметрів.

На рис. 1 показано теплові потоки, що супроводжують роботу гальмового барабана. Тепловий потік внаслідок тертя при гальмуванні  $q_A$  підводиться до робочої поверхні та акумулюється в об'ємі гальмового барабана. Частина теплового потоку відводиться конвекцією  $q_\alpha$  та випромінюванням  $q_\sigma$  у навколишнє середовище.

Шуканими параметрами математичної моделі є значення температури в різних частинах пар тертя гальма в будь-який момент гальмування автотранспортного засобу.

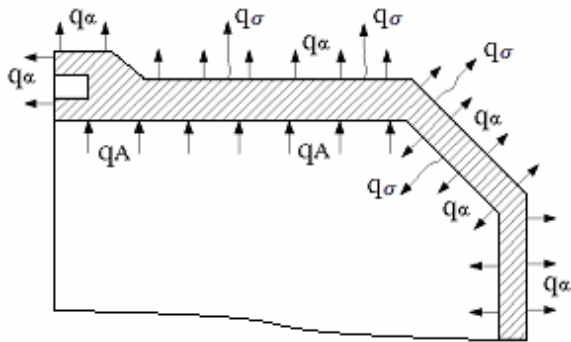


Рис. 1. Теплові процеси в гальмовому барабані

При побудові геометричної форми математичної моделі достатньо розглянути поперечний переріз гальмового барабана (рис. 2). Для визначення характеру температурного поля достатньо визначити дві просторові координати (осьову  $z$  та поперечну  $y$ ) та одну часову. В результаті отримали плоску геометричну форму, яку розбили на 16 горизонтальних частин (4 на ободі гальмового барабана  $I \leq k \leq IV$  і 12 на боковій стінці  $1 \leq j \leq 12$ ), як показано на рис. 2. Розбивку виконано виходячи з необхідності знаходження температури в різних частинах гальмового барабана, а значний температурний градієнт, який спостерігається в боковій стінці, зумовлює її детальний поділ.

Фактично розв'язок моделі зводиться до визначення температури зон гальмового барабана в будь-який момент часу.

Час гальмування  $\tau$  розбили на  $N$ -у кількість часових відрізків. Тривалість одного часового відрізка  $\Delta\tau = \tau/N$ . Номер часового відрізка  $0 \leq i \leq N$ . Отже, тоді проміжок часу від початку гальмування до шуканого моменту часу визначається як  $\tau_i = i\Delta\tau$ .

За невеликих значень інтервалу часу  $\Delta\tau$  (вибір значення  $\Delta\tau$  описаний нижче) можна вважати, що тепловий потік, який виник внаслідок генерування теплоти на робочих поверхнях за певний інтервал часу, впливає виключно на частину I обода гальмового барабана і не встигає протягом інтервалу часу  $\Delta\tau$  вплинути на інші види теплопередачі.

Для теплового потоку на частину I виражається у поглинанні нею певної кількості теплоти та зміні її об'ємної температури пропорційно до поглинутої теплоти. Всі інші види теплопередачі, що існують протягом інтервалу часу  $\Delta\tau_i$ , відбуваються внаслідок перепадів температур, які сформувалися за час  $\tau_{i-1} = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \dots + \Delta\tau_{i-1}$ . Так, зі сторони частини II обода гальмового барабана відбувається кондуктивний теплообмін, внаслідок перепаду середніх температур, які встановились за час  $\tau_{i-1}$  в частині I обода гальмового барабана  $T_{об.(i-1,I)}$  та частині II обода гальмового барабана  $T_{об.(i-1,II)}$ , а зі сторони бокової стінки – кондуктивний теплообмін, внаслідок перепаду середніх температур, що встановились за час  $\tau_{i-1}$  в частині I обода гальмового барабана  $T_{об.(i-1,I)}$  та частині I бокової стінки гальмового барабана  $T_{б.с.(i-1,1)}$ .

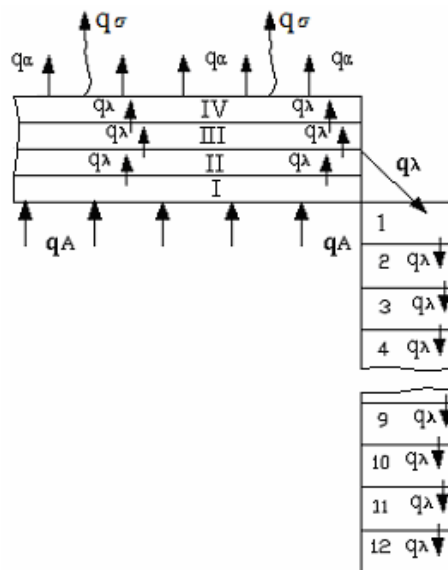


Рис. 2. Зони геометричної форми моделі гальмового барабана автотранспортного засобу

Величина кондуктивного потоку від окремої частини гальмового барабана до частини I його бокової стінки визначається за допомогою залежності

$$Q_{б.с.(i-1,1)}^k = q_{i-1}^k Q_{об.(i-1,1)}, \quad (1)$$

де  $q_{i-1}^k$  – частка кондуктивного теплообміну між частиною  $k$  гальмового барабана та боковою стінкою за інтервал часу  $\Delta\tau_{i-1}$  в за-

гальній величині кондуктивного теплообміну між гальмовим барабаном та його боковою стінкою за аналогічний інтервал часу, %.

Для частини I ( $k=1$ ) гальмового барабана рівняння теплового балансу має наступний вигляд

$$\begin{aligned} \Delta U_{(i,k)} \Delta \tau_i = & m_{об.(k)} c (T_{об.(i,k)} - T_{об.(i-1,k)}) + \\ & + \frac{\lambda (T_{об.(i-1,k)} - T_{об.(i-1,k+1)}) F_{об.} \Delta \tau_i}{\Delta \delta_{k+1}} + \\ & + \frac{\lambda (T_{об.(i-1,k)} - T_{б.с.(i-1,1)}) F_{об.(k)}^\lambda \Delta \tau_i}{\Delta h_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Ліва частина залежності (5) визначається залежно від режиму гальмування. Зрозуміло, що, маючи значення лівої частини та значення всіх температур в попередній момент часу  $\tau_{i-1}$ , нескладно визначити  $T_{об.(i,j)}$ .

На вільній поверхні частини IV обода гальмового барабана відбувається конвективний та променевий теплообмін, внаслідок перепаду середньої температури цієї частини  $T_{об.(i-1,IV)}$  та температури повітря  $T_{пов.}$ . Для прискорення процесу знаходження розв'язку моделі доцільно знехтувати конвективним та променевим теплообміном в інших частинах гальмового барабана (рис. 2), де їх інтенсивність значно нижча.

Зі сторони бокової стінки гальмового барабана відбувається кондуктивний теплообмін, внаслідок перепаду середніх температур обода гальмового барабана в цілому  $T_{об.i-1}$  та частини бокової стінки №1, суміжної з поверхнею обода гальмового барабана  $T_{б.с.(i-1,1)}$ . Зі сторони частини бокової стінки 2 (рис. 2) відбувається кондуктивний теплообмін внаслідок перепаду середніх температур  $T_{б.с.(i-1,1)}$  та  $T_{б.с.(i-1,2)}$ .

Аналогічний кондуктивний теплообмін спостерігається і на внутрішніх поверхнях інших частин бокової стінки гальмового барабана (рис. 3).

Для частин II та III гальмового барабана ( $k = II \dots III$ ) рівняння має наступний вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\lambda (T_{об.(i-1,k-1)} - T_{об.(i-1,k)}) F_{об.} \Delta \tau_i}{\Delta \delta_k} = \\ = m_{об.(k)} c (T_{об.(i,k)} - T_{об.(i-1,k)}) + \\ + \frac{\lambda (T_{об.(i-1,k)} - T_{об.(i-1,k+1)}) F_{об.} \Delta \tau_i}{\Delta \delta_{k+1}} + \\ + \frac{\lambda (T_{об.(i-1,k)} - T_{б.с.(i-1,1)}) F_{об.(k)}^\lambda \Delta \tau_i}{\Delta h_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для частини IV гальмового барабана ( $k = IV$ )

$$\begin{aligned} \frac{\lambda (T_{об.(i-1,k-1)} - T_{об.(i-1,k)}) F_{об.} \Delta \tau_i}{\Delta \delta_k} = \\ = m_{об.(k)} c (T_{об.(i,k)} - T_{об.(i-1,k)}) + \\ + \alpha (T_{об.(i-1,k)} - T_{пов.}) F^K \Delta \tau_i + \\ + \sigma \varepsilon (T_{об.(i-1,k)}^4 - T_{пов.}^4) F^B \Delta \tau_i + \\ + \frac{\lambda (T_{об.(i-1,k)} - T_{б.с.(i-1,1)}) F_{об.(k)}^\lambda \Delta \tau_i}{\Delta h_1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Маючи значення всіх температур в попередній момент часу  $\tau_{i-1}$ , з рівнянь (3) – (4) нескладно визначити  $T_{об.(i,k)}$ .

Рівняння теплового балансу для частини бокової стінки №1 ( $j=1$ ) має наступний вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\lambda (T_{об.(i-1)} - T_{б.с.(i-1,j)}) F_{об.}^\lambda \Delta \tau_i}{\Delta h_1} = \\ = m_{б.с.(j)} c (T_{б.с.(i,j)} - T_{б.с.(i-1,j)}) + \\ + \frac{\lambda (T_{б.с.(i-1,j)} - T_{б.с.(i-1,j+1)}) F_{б.с.(j+1)} \Delta \tau_i}{\Delta h_{j+1}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Середня температура обода  $T_{об.(i-1)}$  гальмового барабана в момент часу  $\tau_{i-1}$  знаходиться за допомогою залежності

$$T_{об.(i-1)} = \frac{\sum_{k=I}^K T_{об.(i-1,k)} F_{об.(k)}^\lambda}{F_{об.}^\lambda}.$$

У рівнянні (5) приймаємо, що  $F_{об.}^\lambda = F_{б.с.(1)}^\lambda$ . Теплота, що підводиться до окремої частини бокової стінки ( $j = 2 \dots 11$ ) за час  $\Delta \tau_i$ , дорівнює різниці кількості теплоти, що підводиться

ся до її бокової поверхні зі сторони обода гальмового барабана, та кількості теплоти, що відводиться від цієї частини у бік бокової стінки. Рівняння теплового балансу для цих частин бокової стінки має наступний вигляд

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda(T_{\text{б.с.}(i-1,j-1)} - T_{\text{б.с.}(i-1,j)})F_{\text{б.с.}(j)}\Delta\tau_i}{\Delta h_j} = \\ & = m_{\text{б.с.}(j)}c(T_{\text{б.с.}(i,j)} - T_{\text{б.с.}(i-1,j)}) + \\ & + \frac{\lambda(T_{\text{б.с.}(i-1,j)} - T_{\text{б.с.}(i-1,j+1)})F_{\text{б.с.}(j+1)}\Delta\tau_i}{\Delta h_{j+1}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Теплота, що підводиться до частини 12 бокової стінки ( $j=12$ ), що межує зі ступицею колеса, за час  $\Delta\tau_i$ , рівна кількості теплоти, яка підводиться до її бокової поверхні зі сторони обода гальмового барабана (зі сторони ступиці тепловідводу не існує). Рівняння теплового балансу для цієї частини має наступний вигляд

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda(T_{\text{б.с.}(i-1,j-1)} - T_{\text{б.с.}(i-1,j)})F_{\text{б.с.}(j)}\Delta\tau_i}{\Delta\delta_j} = \\ & = m_{\text{б.с.}(j)}c(T_{\text{б.с.}(i,j)} - T_{\text{б.с.}(i-1,j)}). \end{aligned} \quad (7)$$

Маючи значення всіх температур в попередній момент часу  $\tau_{i-1}$ , з рівнянь (5) – (7) нескладно визначити  $T_{\text{б.с.}(i,j)}$ .

Таким чином для побудови математичної моделі необхідно записати 16 рівнянь теплового балансу, користуючись (2) – (7), початкову умову (значення поверхневих температур в усіх точках гальмового барабана в початковий момент часу) та граничну умову (значення температури навколишнього середовища).

Розв'язком математичної моделі є знаходження 16 значень температури в момент часу гальмування  $\tau_i$ : 4 значень, що відповідають частинам обода гальмового барабана  $T_{\text{об.}(i,k)}$ , та 12 значень, що відповідають частинам бокової стінки  $T_{\text{б.с.}(i,j)}$ . Після знаходження  $T_{\text{об.}(б.с.)(i,k(j))}$  застосовується ітерація, і отримані значення використовуються для знаходження  $T_{\text{об.}(б.с.)(i+1,k(j))}$ .

Для забезпечення високої точності розрахунку, очевидно, що величини  $\Delta\tau = \tau/N$ ,

$\Delta h = h/M$  та  $\Delta\delta = \delta/K$  повинні бути якомога меншими, але існує обмеження у виборі цих параметрів. Знайдемо співвідношення  $\Delta\delta = f(\Delta\tau)$  та  $\Delta h = f(\Delta\tau)$ .

Тепловий баланс частини обода гальмового барабана  $k=2..4$  товщиною  $\Delta\delta$  представимо в такому вигляді

$$\begin{aligned} & \Lambda_k \frac{\lambda(T_{\text{об.}(i-1,k-1)} - T_{\text{об.}(i-1,k)})F_{\text{об.}(k)}\Delta\tau_i}{\Delta\delta_k} = \\ & = m_{\text{об.}(k)}c(T_{\text{об.}(i,k)} - T_{\text{об.}(i-1,k)}), \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\Lambda_k$  – частка теплоти, яка йде на збільшення об'ємної температури частини обода, від тієї кількості теплоти, що підводиться за допомогою кондуктивного теплообміну до однієї з її сторін.

Величина  $\Lambda_k$  здатна змінюватися в межах 0...1, залежно від того, яка інтенсивність теплообміну з боку інших трьох сторін частини обода. Оскільки розглядається мінімальний часовий інтервал  $\Delta\tau$ , то вважається, що тепловий потік, який виник внаслідок кондуктивного теплообміну, впливає виключно на цю частину обода гальмового барабана і не встигає, протягом інтервалу часу  $\Delta\tau$ , вплинути на інші види теплообміну,  $\Lambda_k = 1$ .

Шляхом переносу величин з однієї частини рівняння (8) в іншу отримали наступне співвідношення

$$\frac{\Lambda_k \lambda F_{\text{об.}(k)} \Delta\tau_i}{\Delta\delta_k m_{\text{об.}(k)} c} = \frac{(T_{\text{об.}(i,k)} - T_{\text{об.}(i-1,k)})}{(T_{\text{об.}(i-1,k-1)} - T_{\text{об.}(i-1,k)})}. \quad (9)$$

Враховавши, що  $m_{\text{об.}(k)} = \Delta\delta_k F_{\text{об.}(k)} \rho$ , отримали

$$\frac{\Delta\delta_k^2 \rho c}{\Lambda_k \lambda \Delta\tau_i} = \frac{(T_{\text{об.}(i-1,k-1)} - T_{\text{об.}(i-1,k)})}{(T_{\text{об.}(i,k)} - T_{\text{об.}(i-1,k)})}. \quad (10)$$

Граничною умовою буде рівність  $T_{\text{об.}(i-1,k-1)} - T_{\text{об.}(i-1,k)} = T_{\text{об.}(i,k)} - T_{\text{об.}(i-1,k)}$ . В дійсності перепад температур є завжди вищим за приріст об'ємної температури, який він сам і спричиняє. Тобто  $\frac{(T_{\text{об.}(i-1,k-1)} - T_{\text{об.}(i-1,k)})}{(T_{\text{об.}(i,k)} - T_{\text{об.}(i-1,k)})} \geq 1$ .

Отже, (10) зводимо до виразу

$$\Delta\delta_k \geq \sqrt{\frac{\Lambda_k \lambda \Delta\tau_i}{\rho c}}. \quad (11)$$

Залежність (11) є необхідною умовою знаходження вірного розв'язку математичної моделі теплообміну гальмового барабана.

На основі наведеного методу дискретизації параметрів математичної моделі та часової ітерації було створено теплову модель засобами Delphi та Microsoft Excel, перевірка адекватності якої дала позитивний результат (відхилення від експериментальних даних не перевищувало 9 %).

### Вплив складових теплового балансу барабаних гальм на їх теплову навантаженість

Теплова модель дозволяє визначити температурне поле гальмового барабана в будь-який момент часу за різних режимів гальмування та дослідити вплив на нього різноманітних чинників: конвекції, випромінювання, кондуктивності.

Розглянемо результати моделювання нестационарного теплообміну під час випробувань типу II, коли температура сягає найвищих значень.

На рис. 3 питомий тепловий потік, що генерується на робочих поверхнях заднього гальмового барабана вантажного автомобіля ЗИЛ з повною масою 11 т, представлений прямою лінією 1, оскільки є сталою величиною. Тепловий потік, що відводиться за допомогою випромінювання 2, протягом гальмування стало зростає, що зумовлено сталим ростом середньої температури гальмового барабана.

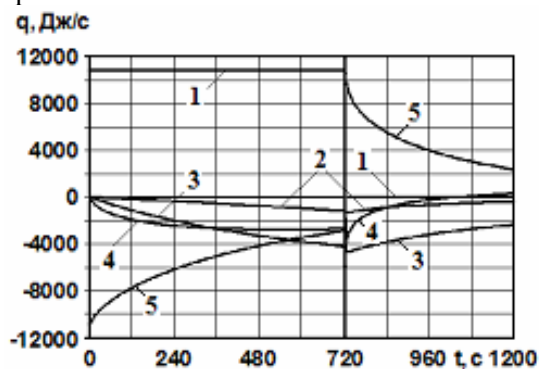
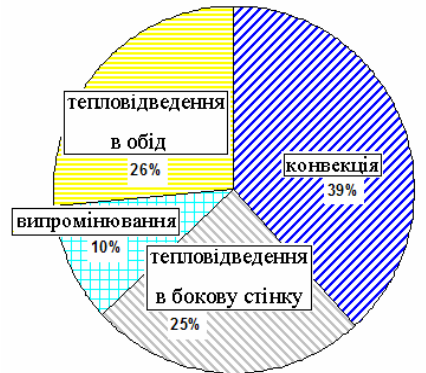


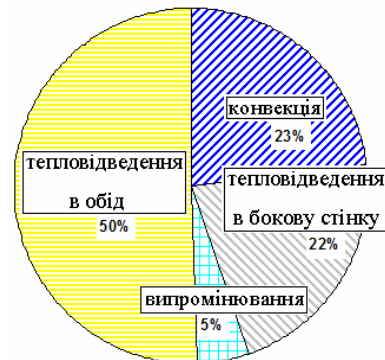
Рис. 3. Динаміка зміни впливу різних складових теплового балансу при 12-хвилинному випробуванні

В кінці стадії попереднього гальмування, що відповідає часу 720 с, його частка становить близько 10 % від генерованого теплового потоку (рис. 5, а), а сумарна частка протягом попереднього етапу випробувань II становить лише 5 % (рис. 5, б). Незначний вплив випромінювання на розсіювання можна пояснити невеликими температурами (максимальна температура досягає 260 °С).

Тепловий потік, що відводиться за допомогою конвекції 3 (рис. 3), протягом гальмування стало зростає, внаслідок росту середньої температури гальмового барабана. Як видно з рис. 4, а, в кінці стадії попереднього гальмування, що відповідає часу 720 с, його частка становить близько 39 % від генерованого теплового потоку; сумарна частка протягом попереднього етапу випробувань II становить 23 % (рис. 4, б).



а



б

Рис. 4. Частки теплових потоків, направлених на поглинання генерованої теплоти під час попереднього етапу гальмування 12-хвилинного випробування: а – протягом 720 секунд (в кінці етапу); б – протягом 720 секунд (сумарні)

Питомий тепловий потік у бокову стінку гальмового барабана 4, внаслідок кондуктивності (рис. 3), протягом гальмування спочатку зростає, що зумовлено ростом середньої

температури обода гальмового барабана. Інтенсивний ріст відбувається до моменту встановлення стабільного температурного перепаду між середніми температурами гальмового барабана та його бокової стінки. Після цього спостерігається помірне зростання. Максимальне значення частки бокової стінки в акумулюванні теплоти в кінці попереднього етапу становить близько 25 % (рис. 4, а), сумарна частка протягом попереднього етапу випробовувань II, показана на рис 4, б, становить 22 %.

Питомий тепловий потік в обід гальмового барабана 5, внаслідок кондуктивності (рис. 3), протягом гальмування стало знижується, що зумовлено ростом власної середньої температури. На початку етапу попереднього гальмування частка обода гальмового барабана становить 100%, а наприкінці, як показано на рис. 4, а, його частка дорівнює близько 26 % від генерованого теплового потоку. Сумарна частка теплоти, що акумулюється ободом гальмового барабана протягом попереднього етапу випробовувань II, становить 50 % (рис. 4, б).

Характер зміни часток теплоти обода гальмового барабана та бокової стінки в акумулюванні генерованої теплоти наочно ілюструється за допомогою зміни приросту середніх температур обода та бокової стінки гальмового барабана протягом попереднього етапу гальмування (рис. 5). Різка зміна питомих часток теплоти обода гальмового барабана та бокової стінки в акумулюванні теплоти простежується протягом першої половини попереднього гальмування. Квазістабільний температурний перепад простежується ближче до завершення попереднього етапу гальмування. Після 720 с можна помітити, що приріст температури обода миттєво набуває від'ємного значення, а приріст температури бокової стінки різко падає, але до 1000 с зберігає знак «+». Це пояснюється тим, що від 720 с до 1000 с бокова стінка акумулює теплоту до зрівняння середніх температур обода та бокової стінки.

Визначальним чинником впливу на розподіл між різними складовими питомих часток акумульованої теплоти є середня температура обода гальмового барабана. Тому важливо встановити динаміку зміни впливу різних складових теплового балансу гальмового барабана (рис. 6) залежно від середньої темпе-

ратури обода гальмового барабана. Як видно з рисунка, характер представлених процесів (до 250 °С) у значній мірі повторює характер процесів, зображених на рис. 4, в частині попереднього етапу (до 720 с).

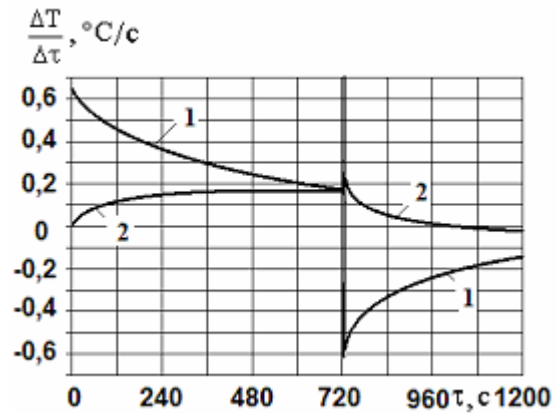


Рис. 5. Приріст середніх температур обода 1 та бокової стінки 2 гальмового барабана протягом випробовування типу II

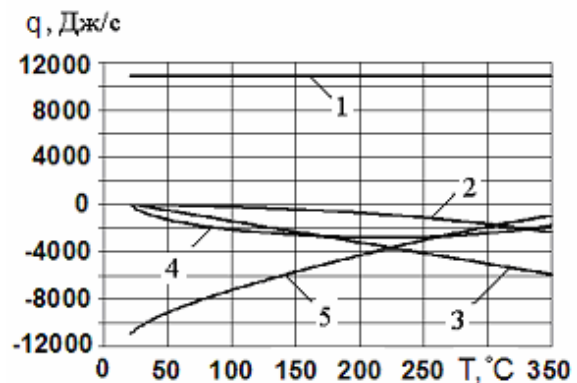


Рис. 6. Динаміка зміни впливу різних складових теплового балансу гальмового барабана залежно від середньої температури обода гальмового барабана

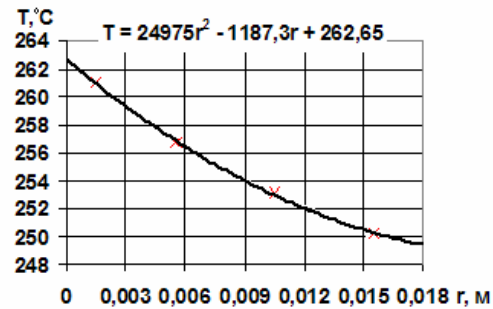
#### Зміна температурного поля за товщиною обода гальмового барабана

Аналізуючи температурне поле гальмового барабана з природним (рис. 7, а) та примусовим (рис. 8, а) охолодженням, після попереднього етапу гальмування спостерігається значний температурний градієнт за висотою бокової стінки 150 та 120 °С, а температурний градієнт обода гальмового барабана є незначним – 10 – 12 °С. Характер зміни температури обода за товщиною представлено на рис. 7, б; 8, б.

250,2
253,1
256,7
261

225,1
198,2
174
152,5
133,6
117,3
103,5
92,2
83,3
76,6
72,2
70,1

а



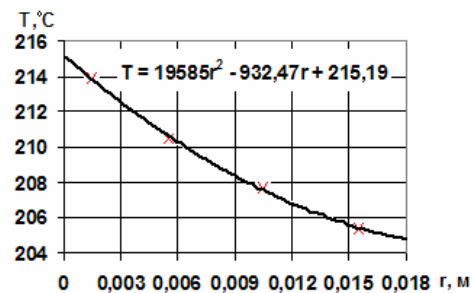
б

Рис. 7. Температурне поле гальмового барабана (а) та характер зміни температури обода за товщиною (б) після попереднього етапу випробовувань типу II

205,4
207,7
210,5
213,9

185
163,2
143,7
126,3
111,1
98
86,9
77,8
70,7
65,3
61,8
60,1

а



б

Рис. 8. Температурне поле гальмового барабана (а) та характер зміни температури обода за товщиною (б) після попереднього етапу випробовувань типу II з примусовим охолодженням

### Висновки

Таким чином, комплексно досліджено динаміку впливу різних чинників на тепловий стан гальм на типових режимах випробувань при їх природному та примусовому охолодженні за допомогою теплової моделі, застосувавши дискретизацію параметрів рівняння теплового балансу та часову ітерацію.

### Література

1. Тормозные устройства: справочник / М.П. Александров, А.Г. Лысяков, Н.В. Фе-

досеев, М.В. Новожилов / Под общ. ред. М.П. Александрова. – М.: Машиностроение, 1985. – 312 с.

2. Вольченко А.И. Тепловой расчет тормозных устройств. – Львов: Вища школа, 1987. – 134 с.

Рецензент: І.І. Капцов, професор, д.т.н., УкрНДІгазу.

Стаття надійшла до редакції 26 березня 2009 р.