

УДК 629.4.077:621.1.016.7: 546.26

О. В. Просвірова,
(старший викладач кафедри залізничного, автомобільного транспорту
та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний
університет імені Володимира Даля)

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПОТОКУ НАБІГАЮЧОГО ПОВІТРЯ НА ТЕПЛОВІДДАЧУ ДИСКОВОГО ГАЛЬМА

Висвітлюються аналіз факторів конвективного теплообміну у гальмовому диску під час гальмування. Розглядається методика розрахунку швидкості руху повітря на поверхні гальмового диска з урахуванням параметрів руху повітряного потоку. Досліджується залежність відносної швидкості руху повітря на поверхні гальмового диска від швидкості руху залізничного транспортного засобу. Визначається коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, який залежить від стану потоку газу, його фізичних властивостей, температури та геометрії обмежуючих поверхонь. Під час гальмування швидкість повітряного потоку висока, і конвективний теплообмін впливає на температуру гальмового диска. Таким чином, коефіцієнт тепловіддачі конвекцією гальмового диска стає одним з ключових параметрів моделювання теплової потужності залізничного гальмового диска. Швидкість повітря в одній точці на поверхні гальмового диска залежить від швидкості поїзда і лінійної швидкості обертання диска. У реальному процесі гальмування, при високій швидкості поїзда, кути між швидкістю поїзда і лінійною швидкістю обертання кожної точки змінюються. Отже, виникає необхідність у еквівалентному коефіцієнті швидкості руху повітря. Одержаний коефіцієнт еквівалентної швидкості руху повітря виражає залежність відносної швидкості руху повітря на поверхні гальмового диска від швидкості руху залізничного транспортного засобу. Одержані результати дозволяють враховувати параметри руху повітряного потоку при обчисленні коефіцієнта тепловіддачі конвекцією.

Ключові слова: залізничний транспорт, конвективний теплообмін, гальмова система, швидкість руху повітря.

Постановка проблеми. Європейські тенденції розвитку залізничного транспорту України спрямовані на підвищення швидкостей, збільшення обсягу перевезень, покращення тяги і підвищення безпеки руху залізничного транспорту. Можливість впровадження цих напрямів розвитку значною мірою залежить від забезпечення ефективної роботи гальмової системи та стійкості гальмування. При взаємодії фрикційних елементів гальмової системи в контакт підвищується температура, що значно впливає на коефіцієнт тертя та на гальмівне зусилля, яке реалізується локомотивом.

Проблема забезпечення ефективності та безпеки гальмування рухомого складу

© Просвірова О. В., 2018

загострюється зі зростанням швидкості руху залізничного транспорту в Україні та світі. Значне збільшення кінетичної енергії, яка при гальмуванні впливає на підвищення температури фрикційних елементів гальма, зумовлює необхідність розробки наукових основ прогнозування і ресурсозберігаючого управління високонавантаженим динамічним фрикційним контактом в режимах граничного стану, дослідження нових методів удосконалення гальмівних характеристик рухомого складу залізниць. Це зумовлює необхідність встановлення і розвиток залежностей для збільшення граничних значень гальмівного зусилля при стабілізації температури і силового навантаження.

Конвективний коефіцієнт теплопередачі – це функція геометричних параметрів, швидкості обертання і температури, яка впливає на структуру потоку та швидкість повітряного потоку над його поверхнею. Геометрична складова, як правило, розбита на області, що визначають прості форми. Для кожної області конвективний коефіцієнт теплопередачі можна визначити за допомогою відповідних рівнянь. Геометрію гальмівного диска можна розділити на обертовий диск (для поверхонь тертя) і обертові циліндри (для ступиці). Крім того, для вентильованого диска можна визначити канали.

Охолоджувальність гальмового диска визначається його матеріалом, формою та іншими чинниками. У вентиляційному апараті гальмового диска під час гальмування відбувається значне підвищення температури повітря, і, таким чином, на внутрішніх елементах диска виникає термічний стрес [1]. Найвищу температуру під час гальмування має фрикційна поверхня диска [2].

Під час гальмування швидкість повітряного потоку висока, і конвективний теплообмін впливає на температуру гальмового диска. Таким чином, коефіцієнт тепловіддачі конвекцією гальмового диска стає одним з ключових параметрів моделювання теплової потужності залізничного гальмового диска. Швидкість повітря в одній точці на поверхні гальмового диска залежить від швидкості поїзда і лінійної швидкості обертання диска [3]. У реальному процесі гальмування при високій швидкості поїзда кути між швидкістю поїзда і лінійною швидкістю обертання кожної точки змінюються. Отже, виникає необхідність у еквівалентному коефіцієнті швидкості руху повітря.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження з підвищення ефективності роботи гальмових пристроїв складаються з робіт за такими основними напрямками:

- розробка нових технічних рішень, спрямованих на удосконалення конструкції гальмових пристроїв;
- математичне моделювання теплофізичних і механічних процесів у зоні фрикційного контакту елементів гальма необхідне для аналізу існуючого та перспективного гальмового обладнання;
- оцінка надійності та технічних ризиків експлуатації гальмового обладнання;
- комп'ютерне моделювання теплофізичних і механічних процесів у зоні фрикційного контакту елементів гальма з використанням кінцево-елементних моделей та аналіз його результатів;
- дослідження з обчислювальної гідрогазодинаміки;
- експериментальні дослідження гальмових пристроїв.

Сучасні дослідження вказують на те, що в початковий момент часу з ростом температури в контакт збільшується коефіцієнт тертя, проте при досягненні критичної температури, яка залежить від матеріалу, структури контактуючих тіл, температури навколишнього повітря та інших факторів, відбувається різке падіння коефіцієнта тертя, що негативно позначається на гальмівних властивостях рухомого складу [4, 5, 6, 7]. У дослідженнях останніх років широко розкривається питання термічних стресів та газодинаміки вентильованих дискових гальм. У роботах [8-10] наводяться результати комп'ютерного моделювання термодинамічних процесів, які відбуваються у дискових гальмах під час руху та гальмування. Але наявні в сучасних дослідженнях аналітичні залежності потребують аналізу та удосконалення з метою отримання можливості визначати та враховувати вплив параметрів руху повітряного потоку.

Метою роботи є аналіз факторів конвективного теплообміну у гальмовому диску під час гальмування та визначення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією, що враховує швидкість руху повітря на поверхні диска.

Викладення основного матеріалу. Опишемо рівняння теплопровідності з граничними умовами для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі конвекцією, що враховує відносну швидкість повітря у гальмовому диску.

Коефіцієнт конвекції не залежить від матеріалу, але залежить від стану потоку рідини або газу, його фізичних властивості, температури та геометрії обмежуючих поверхонь. Поверхня гальмового диска у розрахунках теплопереносу приймається еквівалентною площині [8]:

$$\alpha = 0.664 \left(\frac{v_{\infty} L}{\gamma} \right)^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \frac{\lambda_{\alpha}}{L}, \quad (1)$$

де Pr – константа Прандтля; λ_{α} – теплопровідність повітря, Вт/(м•К); L – це довжина обмежуючої поверхні, м; v_{∞} – швидкість повітря відносно гальмового диска, м/с; γ – кінематична в'язкість повітря, м²/с.

Згідно з моделлю круглих труб зі схрещенням повітряного потоку, коефіцієнт конвекції до радіальних ребер обчислюється за такою формулою:

$$\alpha = 0.248 \left(\frac{v_{\infty} d}{\gamma} \right)^{0.606} Pr^{0.38} \frac{\lambda_{\alpha}}{d}, \quad (2)$$

де d – діаметр охолоджуваного циліндра, м.

Ігноруючи температуру гальмового диска, приймаючи її за температуру навколишнього середовища, вважаємо параметри γ , Pr , λ_{α} константами, тоді α залежить тільки від L та v_{∞} . Оскільки поле течії навколо обертового гальмового диска складне, швидкість руху повітря слід визначати окремо на зовнішній та внутрішній поверхнях фрикційного диска.

Швидкість руху повітря на зовнішній поверхні гальмового диска

Рух гальмового диска – це синтез руху колеса з плоскою динамікою поїзда і його власного обертання, тому швидкість повітря в точці на поверхні гальмового диска

розраховується як синтез швидкості руху залізничного транспортного засобу і лінійної швидкості обертання, ω – це кутова швидкість гальмового диска, як подано на рис. 1.

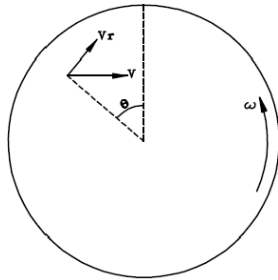


Рис. 1. Розрахункова схема відносної швидкості повітря

У окремий момент часу швидкості руху повітря в різних точках диска відрізняються одна від одної, але вони є симетричними відносно вертикальної площини, радіус диска є незмінним. При циклічній зміні швидкості руху повітря в будь-якій точці, швидкість повітря у будь-якій точці на однаковому радіусі розглядається як змінна тільки по швидкості.

Еквівалентна швидкість руху повітря на одному радіусі може бути розрахована за формулою:

$$v_{\infty} = \int_0^{\pi} \sqrt{(v + \omega r \cos \theta)^2 + (\omega r \sin \theta)^2} d\theta / \pi, \quad (3)$$

де v – швидкість руху поїзда, м/с; ω – кутова швидкість колеса, рад/с; r – радіус точки на гальмовому диску, м; θ – кут, як подано на рис. 1.

Оскільки швидкість руху повітря навколо всього диска симетрична відносно вертикальної площини, необхідно проводити розрахунки для одного з фрикційних дисків. Враховуючи, що:

$$\omega = v/R, \quad (4)$$

де R – радіус колеса, підставимо ω в формулу (3):

$$v_{\infty} = v \int_0^{\pi} \sqrt{2 \frac{r}{R} \cos \theta + \left(\frac{r}{R}\right)^2} d\theta / \pi. \quad (5)$$

Згідно з одержаною формулою, еквівалентна швидкість руху повітря для заданого радіуса залежить тільки від швидкості руху транспортного засобу.

Позначимо коефіцієнтом еквівалентної швидкості руху повітря такий вираз:

$$k = \int_0^{\pi} \sqrt{2 \frac{r}{R} \cos \theta + \left(\frac{r}{R}\right)^2} d\theta / \pi, \quad (6)$$

$$v_{\infty} = vk.$$

Числове значення та графік коефіцієнта еквівалентної швидкості руху повітря отримується чисельним інтегруванням.

На рис. 2 наведено графік залежності коефіцієнта k від радіуса r .

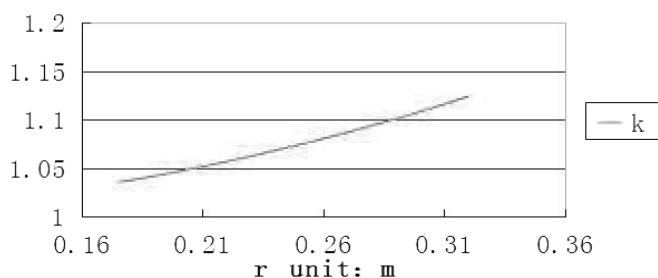


Рис. 2. Коефіцієнт еквівалентної швидкості руху повітря

Швидкість руху повітря на внутрішній поверхні гальмового диска

Геометрична структура внутрішньої поверхні гальмового диска значно складніша за зовнішню через наявність вентиляційного апарату, тому опис повітряного потоку відрізняється. У розрахунках руху повітря у вентиляційному апараті відносна швидкість руху повітря v_{∞} замінюється швидкістю руху поїзда v .

Висновки і перспективи подальшого використання. Запропоновано методику розрахунку швидкості руху повітря на поверхні гальмового диска з урахуванням параметрів руху повітряного потоку. Одержаний коефіцієнт еквівалентної швидкості руху повітря виражає залежність відносної швидкості руху повітря на поверхні гальмового диска від швидкості руху залізничного транспортного засобу. Одержані результати дозволяють враховувати параметри руху повітряного потоку при обчисленні коефіцієнта тепловіддачі конвекцією.

Подяка. Дослідження проводилися на основі науково-дослідної роботи «Створення багатофункціональних наукомістких методів енергетичного управління інженерією поверхонь контакту «колесо – рейка» для забезпечення еколого-ефективної передачі потужності» (№ держ. реєстрації 0117U000561), що фінансуються Міністерством освіти і науки України. Публікація містить результати досліджень, проведених за грантом Президента України за конкурсним проектом Ф70 «Створення багатофункціональних наукоємних методів і інструментів комплексного керування системою «колесо – гальмо – рейка» для запобігання аварійним ситуаціям, усунення ризику екологічних катастроф» (№ держ. реєстрації 0117U006252) Державного фонду фундаментальних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ву М. Обчислення та аналіз температурних полів та полів напружень гальмового диска на квазі-високошвидкісному потязі / М. Ву // Рухомий Склад. –1995, 9. – Вип. 33. – С. 6 – 8
2. Горбунов М.І. Технічні рішення по стабілізації температури фрикційних елементів гальм / М.І. Горбунов, К.О. Кравченко, О.С. Ноженко, О.В. Просвірова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля:– Луганськ: СХУ ім. В. Даля, 2013 – № 4(193) – С. 68 – 72.
3. Янь І. Моделювання гальмівного диска на основі 3-вимірної моделі / І. Янь // Комп'ютерне Моделювання, 2005, 10. – Вип. 22, № 10. – С. 225 – 227.
4. Фомін О.В. Аналіз доцільності застосування шестигранних порожнистих профілів в якості складових елементів несучих систем напіввагонів/ О.В. Фомін // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: науковий журнал. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ ім. В. Лазаряна, 2014. – Вип. 6(54). – С. 146-153.
5. Фомін О.В. Варіаційне описання конструктивних виконань вантажних вагонів/ О.В. Фомін, А.В. Гостра // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту: Серія «Транспортні системи і технології». – Київ: ДЕТУТ, 2015. – Вип. 26-27. – С. 137-147.

6. Gorbunov M. Research to improve traction and dynamic quality of locomotives / Mykola Gorbunov, Vaclav Pistek, Maksym Kovtanets, Olena Nozhenko, Sergii Kara, Pavel Kučera // JVE International LTD. Vibroengineering Procedia. – 2017. – Vol. 13, ISSN 2345-0533. – P. 159-164.
7. Gerlici J. Slipping and skidding occurrence probability decreasing by means of the friction controlling in the wheel-braking pad and wheel-rail contacts / J. Gerlici, M. Gorgunov, K. Kravchenko, R. Domin, M. Kovtanets, T. Lack // «Manufacturing Technology». April 2017, Vol. 17, No 2. – p. 179-186.
8. Су Я. Передача тепла. // Вид-во: університет науки і технологій. – Ухань:Хуажонг, 2009 – 116 с.
9. Сибья В. Теплове моделювання гальмового диска високошвидкісного поїзда.// II Міжнародна конференція електронних і механічних інженерних та інформаційних технологій (ЕМЕІТ-2012). – С. 145–149.
10. Моно А.Г. Тепловий режим дискового гальма шахтного локомотива. // Металургійна і горно-рудна промисловість. – №.4. – С. 99 – 102.

REFERENCES

1. Wu M. The temperature field and stress field computation and analysis of brake disc based on quasi-high-speed train. *Rolling Stock*, 1995, 9, Vol 33, pp. 6-8.
2. Gorbunov N.I., Kravchenko K.A., Nozhenko O.S., Prosvirova O.V. *Tekhnichni rishennya po stabilizatsiyi temperatury fryktsiynykh elementiv halm* [Technical solutions for temperature stabilization of the friction elements of the brakes], Gorbunov M. I., K. A. Kravchenko, A. S. Nozhenko, A. V. Prosvirov, Vestnik of East-Ukrainian national University named after Volodymyr Dahl No. 4(193). Lugansk, VDEUNU, 2013, pp. 68 – 72.
3. Yang Y. The Transient Temperature Field Simulation of Brake Disc Based on 3-Dimensional Model. *Computer Simulation*, 2005, 10, Vol 22, №.10, pp. 225 – 227.
4. Fomin O.V. Analiz dotsilnosti zastosuvannya shestyhrannykh porozhnystykh profiliv v yakosti skladovykh elementiv nesuchykh system napivvohoniv [Analysis of the appropriateness of the use of hexagonal hollow profiles as components of the bearing systems of gondola cars] // *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. akademika V. Lazariana, Nauka ta prohres transportu*, 2014, № 6 (54), pp. 146-153.
5. Fomin O.V., Gostra A.V. Variacijne opisannja konstruktivnih vikonan' vantazhnykh vagoniv [Variations describe the structural designs of freight cars] // *Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine series «Transport systems and technologies»*. – Kyiv: DETUT, 2015, Vyp. 26-27, pp. 137 –147.
6. Gorbunov M., Pistek V., Kovtanets M., Nozhenko O., Kara S., Kučera P. Research to improve traction and dynamic quality of locomotives / JVE International LTD. *Vibroengineering Procedia*, Sep 2017, Vol. 13, ISSN 2345-0533, pp. 159 – 164.
7. Gerlici J., Gorgunov M., Kravchenko K., Domin R., Kovtanets M., Lack T. Slipping and skidding occurrence probability decreasing by means of the friction controlling in the wheel-braking pad and wheel-rail contacts / *Manufacturing Technology*, April 2017, Vol. 17, № 2, pp. 179 – 186.
8. Su Y. Heat Transfer. Wuhan:Huazhong // University of Science & Technology Press, 2009, 116 p.
9. Wu X. Heat Simulation of High-speed Train's Brake Disc Considering the Wind Speed of Disc Surface Influence on Co vection Coefficient. *2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012)*, pp. 145 – 149.
10. Monia, A.G. *Teplovyy rezhym diskovoho hal'ma shakhtnoho lokomotyva* [Thermal mode of a disk brake of the mine locomotive], *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, no.4, pp. 99–102.

О. В. Просви́рова

(старший преподаватель кафедры железнодорожного, автомобильного транспорта и подъемно-транспортных машин, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТОКА НАБЕГАЮЩЕГО ВОЗДУХА НА ТЕПЛООТДАЧУ ДИСКОВЫХ ТОРМОЗОВ

Освещаются анализ факторов конвективного теплообмена в тормозном диске во время торможения. Рассматривается методика расчета скорости движения воздуха на поверхности тормозного диска с учетом параметров движения воздушного потока. Исследуется зависимость относительной скорости движения

воздуха на поверхности тормозного диска от скорости движения железнодорожного транспортного средства. Определяется коэффициент теплоотдачи конвекцией, который зависит от состояния потока газа, его физических свойств, температуры и геометрии ограничивающих поверхностей. Во время торможения скорость воздушного потока высока, и конвективный теплообмен влияет на температуру тормозного диска. Таким образом, коэффициент теплоотдачи конвекцией тормозного диска становится одним из ключевых параметров моделирования тепловой мощности железнодорожного тормозного диска. Скорость воздуха в одной точке на поверхности тормозного диска зависит от скорости поезда и линейной скорости вращения диска. В реальном процессе торможения при высокой скорости поезда углы между скоростью поезда и линейной скоростью вращения каждой точки меняются. Следовательно, возникает необходимость в эквивалентном коэффициенте скорости движения воздуха. Полученный коэффициент эквивалентной скорости движения воздуха выражает зависимость относительной скорости движения воздуха на поверхности тормозного диска от скорости движения железнодорожного транспортного средства. Полученные результаты позволяют учитывать параметры движения воздушного потока при вычислении коэффициента теплоотдачи конвекцией.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, конвективный теплообмен, тормозная система, скорость движения воздуха.

Olga V. Prosvirova,

(senior teacher of the Department of Railway and road transport, lift and care systems, V. Dahl East Ukrainian National University)

IDENTIFICATION OF THE THE INCOMING AIR FLOW INFLUENCE ON THE HEAT DISSIPATION OF DISK BRAKES

Highlights the analysis of the factors of convective heat transfer in the brake disk during braking. The technique of calculating a speed of movement of air on the surface of the brake disc by the movement of the air flow. We study the dependence of the relative velocity of air on the surface of the brake disc from the speed of a railway vehicle. Determined the heat transfer coefficient by convection, which depends on the state of the gas flow, its physical properties, temperature and geometry of the bounding surfaces. During braking the speed of air flow high, and convective heat transfer affects the temperature of the brake disc. Thus, the heat transfer coefficient by convection of the brake disc becomes one of the key parameters of modeling thermal capacity of the railway brake disc. The air velocity at one point on the surface of the brake disc depends on the speed of the train and the linear velocity of disc rotation. In the actual process of braking at high speed trains the angles between the train speed and the linear speed of each point change. Consequently, there is a need for equivalent coefficient of air velocity. The resulting ratio is equivalent to the velocity of the air expresses the dependence of the relative velocity of air on the surface of the brake disc from the speed of a railway vehicle. The obtained results allow to consider the parameters of movement of air flow when calculating the heat transfer coefficient by convection.

Keywords: railway transport, convective heat dissipation, brake system, airflow.

Стаття надійшла до редакції 02.11.2017 р.