

УДК 533.6.013.11

С. А. ГРЯЗНОВА, старший преподаватель

Харьковский национальный автомобильный университет (ХНАДУ), г. Харьков

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ТЯГОВОГО РОЗРАХУНКУ ПОЇЗДІВ В ТУНЕЛІ

Рассматривается метод тягового расчета поездов в туннеле, который в отличие от ранее известных методов, учитывает неоднородности воздушной среды. Нестационарный характер движения циркуляционных потоков учитывается через коэффициент трения воздушной среды. Величины указанных коэффициентов должны быть определены для каждого конкретного перегона метрополитена. Предложенный метод позволяет определить резервы экономии энергоресурсов во время следования электропоезда по всем элементам участка в каждом конкретном случае.

Ключевые слова: неоднородности воздушной среды, сопротивление движению, коэффициент трения воздушной среды.

Розглядається метод тягового розрахунку поїздів в тунелі, який в відмінні від раніше відомих методів, враховує неоднорідності повітряного середовища. Нестационарний характер руху циркуляційних потоків враховується через коефіцієнт тертя повітряного середовища. Величини вказаних коефіцієнтів повинні бути визначені для кожного конкретного перегону метрополітену. Запропонований метод дозволяє визначити резерви економії енергоресурсів під час проходження електропоїзда по всіх елементах ділянки у кожному конкретному випадку.

Ключові слова: неоднорідності повітряного середовища, опір руху, коефіцієнт тертя повітряного середовища.

Вступ

На основі аналізу впливу неоднорідності повітряного середовища на тягові характеристики рухомого складу одержав подальший розвиток метод розрахунку повітряного опору рухомого складу в тунелі, що враховує вплив вентиляційних потоків, втрат на місцевих гідравлічних опорах по всій довжині активної ділянки, нестационарний характер руху повітряного середовища.

Основна частина

Фізична картина взаємодії рухомого складу з повітряним середовищем є наступною [1, 2]. Під час руху в тунелі, працюючи як поршень, поїзд приводить в рух повітря тунелю. Спереду поїзду надлишковий тиск витрачається на подолання опору повітря в передній частині. Розрідження, яке виникає за поїздом, витрачається на подолання опору повітря у задній частині. Різниця тиску перед головним і останнім вагонами поїзда викликає перетікання повітря уздовж зазору між стінами тунелю і вагонами, в напрямку, протилежному до напрямку руху.

В той же час сила опору поїзда захоплює повітря в зазорі в напрямку руху. Взаємодія між цими двома факторами призводить до того, що в одному випадку в зазорі виникає попутна течія, а в другому – зустрічне. В утворенні повітряних потоків великий вплив оказують вентиляційні установки.

Загальний потік формується шляхом сумування двох потоків:

- 1) потік з потягів;
- 2) потік з системи вентиляції.

Можлива присутність конвективного потоку через різницю температур, але ці потоки зневажливо малі і тому вони можуть бути проігноровані.

Встановимо основні відношення між опором повітря і складовими руху на різних ділянках тунелю. Потяг приводить в рух повітря тунелю, повідомляючи йому швидкість C .

Перед поїздом існує надлишок тиску:

$$h_1 = p_1 - p_0 > 0 \text{ кг/м}^2, \quad (1)$$

який витрачається на подолання повітряного опору в передній ділянці тунелю. За поїздом виникає розрядження:

$$h_2 = p_2 - p_0 < 0 \text{ кг/м}^2. \quad (2)$$

Тунельне повітря набігає на потяг з відносною швидкістю:

$$v_T = v_0 - c \pm c_{\text{вент}}, \quad (3)$$

де c – швидкість повітря тунелю і рухається в зазорі з відносною швидкістю v_3 .

Складова $C_{\text{вент}}$, обумовлена роботою вентиляційної системи, визначається з формули Цодікова В. Я. [3,4]:

$$C_{\text{вент}} = \frac{G_{\text{вент}}}{f} = \frac{Q_{\text{наб}}}{((I_{\text{кінц}} - I_{\text{поч}}) - \frac{Q_{\text{наб}}}{4G_{\text{ц}}}) \cdot f}, \quad (4)$$

де $G_{\text{ц}} \approx G_{\text{заг}} - G_{\text{вент}}$;

f – площа поперечного перетину тунелю в м^2 ;

$Q_{\text{наб}}$ – теплотривки в тунелях, асимільовані повітрям, що подається системою тунельної вентиляції;

$I_{\text{кінц}}$ – кінцеве, розрахункове тепловміст повітря в тунелі в кінці розрахункової ділянки станції, з боку якої потяги входять на станцію ккал/год ;

$I_{\text{поч}}$ – початкове, розрахункове тепловміст зовнішнього повітря, відповідне для теплого періоду року, ккал/кг .

Для визначення аеродинамічних характеристик поїздів з урахуванням місцевих неоднорідностей повітряного потоку перегін розбивається на окремі ділянки з таким розрахунком, щоб на одну ділянку приходилось одне джерело збурення повітря.

До джерел збурення повітря відносяться: різкі зміни геометрії тунелю (вхід в тунель та вихід в тунелю, вентзбійки, шахти, горизонтальні перемички та інш.), а також джерела (стоки) додаткових вентиляційних потоків.

Тоді на кожній j -ої ділянці втрати натиску в тунелі з урахуванням змін геометрії поперечного перетину тунелю по довжині перегону визначаються як:

$$\Delta h_j = \xi_{Tj} \cdot \rho \cdot \frac{c_j^2}{2}, \quad (5)$$

c_j – середня швидкість повітря для j -ої ділянки;

$\xi_{Tj} = \xi_{\text{вх}j} + \xi_{\text{тр}j}$ – для ділянки, яка містить в собі вхід в тунель (перегін);

$\xi_{Tj} = \xi_{\text{вих}j} + \xi_{\text{тр}j}$ – для ділянки, яка містить в собі вихід з тунелю (перегону);

$\xi_{Tj} = \xi_{Mj} + \xi_{\text{тр}j}$ – для інших ділянок,

$\xi_{\text{вх}j}, \xi_{\text{вих}j}$ – коефіцієнти гідравлічних витрат, викликаних різким звуженням тунелю (вхід) та розширенням тунелю (вихід), відповідно;

ξ_{Mj} – коефіцієнти місцевих опорів, викликаних різкою зміною конфігурації живого перетину повітряного потоку, відповідно, ззаду і спереду рухомого складу;

ξ_{mpj} – коефіцієнт тертя повітря об стіни тунелю на j -ої ділянці.

Необхідно відзначити, що в роботах [1,2] величини коефіцієнтів місцевих опорів пропонуються визначати для випадків раптового звуження і раптового розширення потоку ($\xi_{ex} = 0,5; \xi_{вих} = 1; \xi_M = \xi_{ex} + \xi_{вих}$). Такий підхід не враховує перетікання повітря між паралельними одноколійними тунелями через циркуляційні збійки та витрати на місцях різних змін геометрії тунелю вздовж перегону. Тому величини вказаних коефіцієнтів повинні бути визначені для кожного конкретного перегону метрополітену. Коефіцієнти ξ_{Mj} визначаються на основі експериментальних даних для конкретного виду зміни перетину (раптового розширення, відгалуження під кутом 90^0 і т.д.). Такі коефіцієнти називаються місцевими гідравлічними опорами, значення їх в залежності від геометричних розмірів приведені в довідниках по гідравліці. В таблиці дані значення цих коефіцієнтів для найбільш характерних випадків руху поїзду в тунелі.

Таблиця

Значення коефіцієнтів місцевих гідравлічних опорів

Ділянка	Джерело збурення	Значення	Схематичне зображення
Вхід в тунель	Раптове звуження	0,5	
Збійка	Відгалуження	1,0...1,4	
Вентиляційна збійка (не працююча)	Відгалуження	1,0...1,4	
Вентиляційна шахта (не працююча)	Відгалуження	1,0...1,4	
Вентиляційна збійка (працююча)	Відгалуження + стік (зима) / джерело (літо)	1,6...1,8	
Вентиляційна шахта (працююча)	Відгалуження + стік (літо) / джерело (зима)	1,6...1,8	
Вихід з тунелю	Раптове збільшення	1,0	

Витрати на тертя на j -ої ділянці визначаються як сума витрат на тертя при усталеному руху та зміни тертя при нестационарному руху:

$$\xi_{mpj} = (\lambda_j + \Delta\lambda_{нест. j}) \frac{l_j}{D_{2j}} \tag{6}$$

де $D_{2j} = 4 \frac{f_j}{u_j}$ – гідравлічний діаметр перегону тунелю на j -ої розрахункової ділянці в m ;

u – периметр поперечного перетину тунелю в m ;

l_j – довжина j -ої розрахункової ділянки тунелю між станціями в m ;

λ_j – коефіцієнт тертя повітря об стінки тунелю;

ρ – масова щільність повітря;

$\Delta\lambda_{нест j}$ – складова коефіцієнту тертя, яка обумовлена нестационарним характером руху повітря в тунелі.

Коефіцієнт λ_j залежить від якості поверхні стін тунелю: для гладкої ділянки тунелю – 0,015, для ребристої ділянки тунелю – 0,038.

Нестационарний додаток до коефіцієнту тертя є функцією зміни швидкості і прискорення повітряного потоку на j -ої ділянці:

$$\Delta\lambda_j = f\left(\frac{dv}{dt}; \frac{d^2v}{dt^2}\right). \tag{7}$$

Отже, втрата напору в тунелі (перегоні метрополітену) визначається як сума втрат на окремих ділянках:

$$h_1 - h_2 = \sum_{j=1}^N \xi_{Tj} \rho \frac{c_j^2}{2}. \tag{8}$$

Тоді, величина Q_T може бути визначена з формули

$$Q_{Tj} = f \sum_{j=1}^N \left[\xi_{Tj} \frac{c_j^2}{v^2} - \xi_{3j} \frac{(v - c_j)^2}{v^2} \right] \rho \frac{v^2}{2 \cdot 3,6^2} \tag{9}$$

де $\xi_{3j} = \frac{\alpha_j(1 + \alpha_j)}{1 - \alpha_j}$;

$\alpha_j = \frac{F}{f}$ – коефіцієнт заповнення поїздом поперечного перетину тунелю j -ої

ділянки;

F – поперечний перетин вагону в m^2 .

Для обліку нестационарного характеру руху повітряного потоку коефіцієнт ξ_{Tj} визначається по формулі (6).

Необхідно відмітити, що експериментальні роботи впливу місцевих гідравлічних опорів на тягу поїздів в тунелі, практично відсутні. В роботах [5, 6], які присвячені покращенню енергетичних показників метрополітенів, приведені тільки певні дані, які не відображають дійсного характеру процесу зміни опору руху поїздів в тунелі.

Тому для обґрунтування достовірності запропонованого розрахункового методу визначення повітряного опору поїздів в тунелі були використані дані експериментальних досліджень повного тиску, які були проведені у 1978 році співробітниками Харківського інституту інженерів залізничного транспорту (ХІІЗТ) на перегоні між станціями “Радянська” – “Проспект Гагаріна” Харківського метрополітену (рис. 1) [7].

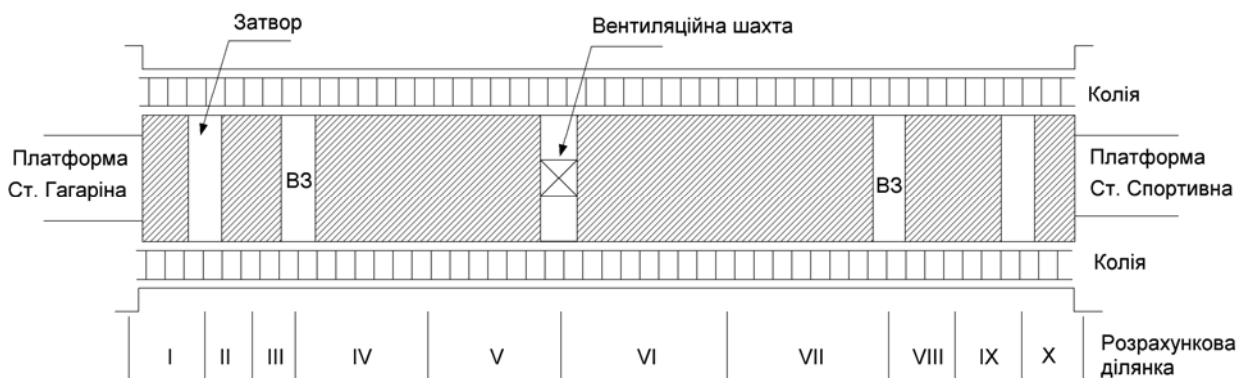


Рис.1 –Розрахункова ділянка перегінного тунелю між станціями “Спортивна” – “Проспект Гагаріна” Харківського метрополітену

Залежність швидкості руху від часу по довжині перегону наведена на рис. 2.

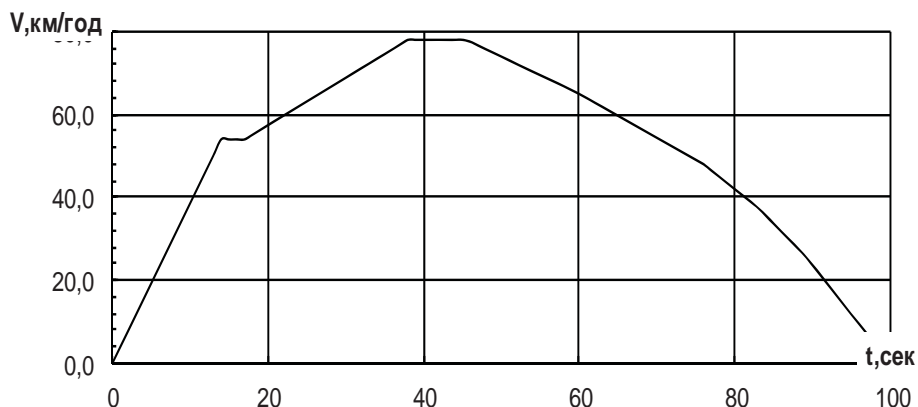


Рис. 2. Залежність швидкості руху від часу по довжині перегону

На рис. 3 наведені графіки зміни повного тиску по довжині перегону, де крива 1 – результати експерименту (ХПЗТ); крива 2 – результати досліджень (розрахункові дані автора). Ці розрахункові дані були отримані з урахуванням втрат напору по довжині перегону, які визначались за формулою (8). На даному рисунку також позначені місця проходження поїздом збійок, шахти та кінця тунелю.

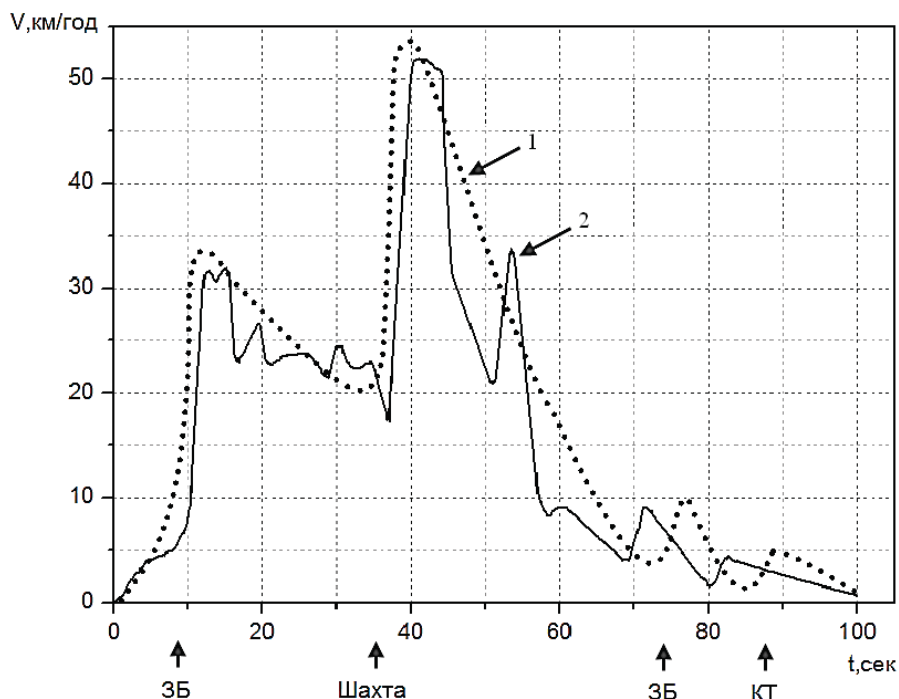


Рис. 3. Порівняння розрахункових та експериментальних даних

Аналіз приведених на рис. 3 показує, що дані розрахунків задовільно узгоджуються з експериментальними даними. Розрахунковий метод добре “реагує” на впливи повітряних збурень від різних змін геометрії тунелю в місцях розміщення шахти, збійок і таке інше.

Висновки

На підставі приведених розрахункових та експериментальних досліджень по визначенню тиску в тунелях Харківського метрополітену зроблені такі висновки:

- 1) Тиск в тунелях має нерівномірний характер;
- 2) Найбільша нерівномірність тиску проявляється в районі циркуляційних збійок та вентиляційних шахт;

- 3) Найбільші величини тиску спостерігаються в першій полові тунелю, в напрямку руху потягу, поступово зменшуючись по мірі приближення до станції;
- 5) Пряма залежність між швидкістю руху потягу та тиском в тунелях спостерігається не на всій протяжності тунелю;
- 6) Особливо різкі зміни тиску спостерігаються після проходження циркуляційних збійок та вентиляційних шахт в першій половині тунелю та незначні – у циркуляційних збійок, які знаходяться перед виходом рухомого складу на станцію;
- 7) Характер кривих тиску в тунелях не змінюється при зміні кількості поданого повітря тунельної та станційної вентиляції, а змінюється лише величина тиску;
- 8) Виявлено незбіг явної картини руху повітря в зазорі між стінками рухомого складу і тунелем, з теоретичним, який був прийнятий раніше;
- 9) Отримано результати зміни повітряного опору поїзда по довжині перегону з урахуванням локальних місцевих гідравлічних опорів;
- 10) Спостерігаються різкі збільшення повітряного потоку при руху потягу в тунелі в районі входу-виходу в тунель, а також при проходженні поїздом вентиляційних шахт.

Список литературы

1. Абрамович Г. Н. К расчету воздушного сопротивления поезда на открытой трассе и в тоннеле //Труды ЦАГИ им. проф. Н. Е. Жуковского, 1939, вып. № 400, – С. 3–32 .
2. Радченко В. Д. Сопротивление движению вагонов метрополитена. – М.: Недра, 1957. – 70 с.
3. Цодиков В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. – М.: Недра, 1975. – 313 с.
4. Цодиков В. Я. Взаимодействие системы тоннельной вентиляции и поршневого эффекта движущихся в метрополитене поездов. – М.: Транспортное строительство, 1974. – № 5. – С. 47–49.
5. Романенко Г. А. Исследования по аэродинамике скоростных поездов // Научн. тр. ин-та механики МГУ. – 1970. – № 4. – С. 51–61.
6. Сюзюмова Е. И., Романенко Г. А. Сравнительные исследования воздушного сопротивления пассажирских поездов // Совершенствование процессов теплообмена и аэродинамики электроподвижного состава. – М., 1979. – С. 97–106 [Тр. Всесоюз. н.-и ин-та ж.-д. транс. – Вып. 539] .
7. Изучение явления «дутья» на Харьковском метрополитене с выдачей рекомендаций по его уменьшению, В 2-х частях: Отчет о НИР / ХИИЖТ Харьков, 1980. – Часть 1. – 312 с.; Часть 2. – 480 с.
8. Справочник по гидравлике /Под ред. В. А . Большакова. – 2-е изд. – Київ: – Вища школа. – 1984. – 343 с.

AN IMPROVEMENT OF METHOD OF HAULING CALCULATION OF TRAINS IS IN TUNNEL

S. A. GRYAZNOVA, senior teacher

Influence of the hauling calculation method of trains in a tunnel that unlike earlier the known methods takes into account to heterogeneity of air environment. Non-stationary character of motion of circulations streams is taken into account through the coefficient of friction of air environment. The sizes of the indicated coefficients must be certain for every concrete driving of underground passage. The offered method allows to define backlogs of economy of power resources during the following of electric train on all elements of area in every case.

Keywords: *heterogeneity of air environment, resistance to motion, coefficient of friction of air environment.*

Поступила в редакцию 04.04 2012 г.