

УДК 629.4.016.56: 533.68

С. Т. ДЖАББАРОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство», Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, ул. Адылходжаева, 1, Ташкент, Узбекистан, 100167, тел. +99 (890) 185 29 34, эл. почта _saidhon_@inbox.ru, ORCID 0000-0002-3798-407X

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЕЗДА

Цель. В научной работе необходимо провести исследование аэродинамического давления и распределения поля скоростей воздушных потоков вдоль движущегося высокоскоростного поезда. **Методика.** Исследование распределения поля скоростей вокруг движущегося высокоскоростного поезда произведено методом имитирования его движения как осесимметричного тела с формой головной и хвостовой частей в виде оживало в сжимаемой (акустической) среде. **Результаты.** Определены значения абсолютной скорости (теоретической) воздушного потока, образуемого движением тела (в случае, когда тело движется с постоянной скоростью (200, 250, 350, 400 км/час) на некоторой высоте от поверхности земли), для точек, находящихся на различном расстоянии от оси движущегося тела (скоростного поезда). По результатам расчетов построены графики изменения скорости воздушного потока в акустической среде вдоль движущегося тела на различном расстоянии от него. Используя закон Бернулли (зависимости изменения давления от скорости потока), определены значения избыточного давления, создаваемого воздушным потоком от движущегося тела. **Научная новизна.** Впервые теоретические исследования аэродинамики высокоскоростного поезда проведено на примере осесимметричного тела с формой головной и хвостовой части в виде оживало в сжимаемой (акустической) среде, движущегося с установленной скоростью. Результаты исследований позволяют установить распределение избыточного давления воздушного потока, образуемого вдоль движущегося высокоскоростного поезда. **Практическая значимость.** Полученные автором результаты позволяют установить: 1) требования к физико-механическим и прочностным характеристикам отдельных элементов объектов инфраструктуры железных дорог на участках обращения высокоскоростных поездов, подверженных аэродинамическому давлению; 2) безопасное минимальное расстояние нахождения людей от колес при прохождении высокоскоростного поезда.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; движение высокоскоростных поездов; аэродинамика; воздушный поток; поля скоростей; аэродинамическое давление; зона безопасности

Введение

В связи со значительным увеличением скоростей движения поездов более актуальными стали вопросы обеспечения комфорта; высокой безопасности движения поездов и пассажиров; исключения травматизма людей, ожидающих на платформах, а также работников железной дороги, находящихся в непосредственной близости от проходящего высокоскоростного поезда.

Обеспечение безопасности требует исследования аэродинамических особенностей, связанных с воздушным потоком, возникающим при движении скоростного и высокоскоростного поезда.

Аэродинамическое воздействие на человека зависит не только от максимальной скорости воздушного потока, но и от его продолжительности. При этом большое значение имеет где,

на какой высоте и на каком расстоянии стоит человек относительно движущегося высокоскоростного поезда.

Экспериментальные исследования аэродинамического воздействия на людей в 80-е годы XX века проводились в Японии, Франции, Германии, США, России и других странах. В ходе натурных исследований были установлены скорости воздушных потоков, значение аэродинамического давления вокруг скоростного поезда и его воздействие на людей, находящихся на пассажирской платформе и конструкционные элементы пассажирских зданий.

Результаты исследований аэродинамического сопротивления движению поезда с использованием аэродинамической трубы и модели поездов позволили установить зависимости величины аэродинамического сопротивления от

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

скорости, формы головного вагона и хвостовой части поезда, условий движений (в тоннеле или открытой местности), типа поезда (для поездов TGV, ICE) [2–5, 20].

Аэродинамические особенности движения скоростного поезда в тоннеле позволили определить величину давления сжатого воздуха на стенки вагонов (оконные и дверные застекления, в том числе двухэтажных вагонов), усовершенствовать конструкцию вагонов, предотвратить их разрушение [16, 20].

Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия движущегося скоростного поезда с объектами находящимися вдоль железной дороги и поездами (скоростными или грузовыми), движущимися по параллельному пути (навстречу или в одном направлении), позволили установить (рекомендовать) безопасное расстояния нахождения пассажиров на низких или высоких станционных платформах, предотвратить опрокидывания грузовых контейнеров [6, 9, 10, 13, 17, 19, 21, 22]. Было установлено, что импульс давления, вызванный поездами, проходящими навстречу друг другу в открытой местности, может привести к конструктивным проблемам в самих поездах непосредственно и структурах полосы отчуждения.

Результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований К.Бейкера позволили установить и понять физику образования аэродинамических потоков во всех частях движущегося скоростного поезда; обеспечить безопасность и комфортабельность пассажирам; разработать мероприятия по уменьшению аэродинамического сопротивления движению поезда [11, 12, 14, 15, 18, 23].

При многообразии научно-исследовательских работ количественное влияние на человека, конструкционные элементы пассажирских зданий устойчивой скорости и длительности воздушных потоков изучены недостаточно. Самое главное, что аэродинамическое воздействие на людей, как критерий безопасности при высокоскоростном движении пассажирских поездов, не учитывается.

Цель

Значительное увеличение скорости движения пассажирских поездов привело к изменению физики воздушных потоков вокруг скоро-

стных поездов. Движение высокоскоростных поездов имеет свойственные ему особенности, которые не позволяют использовать аэродинамические законы летательных аппаратов. При движении высокоскоростного поезда в открытой местности, происходит изменение аэродинамического поля вблизи движущегося поезда. Сила и направленность давлений зависят от таких факторов, как скорость и геометрия поезда, присутствия и близости окружающих объектов.

Так как аэродинамическое давление является производным аэродинамических потоков, теоретически исследуем распределение поля скоростей вдоль движущегося высокоскоростного поезда.

Методика

Исследование распределения поля скоростей вокруг движущегося высокоскоростного поезда произведено имитированием его движения как осесимметричного тела с формой головной и хвостовой части в виде оживало в сжимаемой (акустической) среде (рис. 1, а) [1].

Положение тел в пространстве в произвольном сечении z представлено на рис. 1, б. Осесимметричное тело длиной L движется в сжимаемой (акустической) среде с постоянной скоростью v_0 и находится на высоте h от границы полупространства (рис. 1), наибольшее удаление границы тела от продольной оси равно R . При этом полагаем, что $R/L \ll 1$. Для решения задачи введены осесимметричные координаты $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ и z_1 . Время движения обозначено как t . Начало координат установлено в среднем сечении тела, ось Oz_1 направлено по оси тела, а ось Or перпендикулярная к ней.

Составляющие скоростей частиц воздушной среды по осям координат Oz и Or можно определить через потенциал скорости $\varphi_1(r, z_1, t)$ соответственно по формулам

$$v_z = \partial\varphi_1/\partial z, \quad (1)$$

$$v_r = \partial\varphi_1/\partial r.$$

Распространения акустической волны в воздушной среде можно представить в виде сле-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

дующого уравнения

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z_1^2} \right),$$

где a – акустическая скорость звука.

Так как движение тела происходит вдоль оси Oz_1 , вводится подвижная система координат $z = z_1 - v_0 t$.

Уравнение (1) можно привести в виде

$$\alpha^2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

где $\alpha = \sqrt{1 - M^2}$, $M = v_0 / a$ – число Маха.

Движение тела в акустической среде считается дозвуковым, то есть предполагается, что $M < 1$. Тогда уравнение (2) интегрируется при следующих граничных условиях:

1. Безотрывности скольжения частиц воздушной среды по поверхности тела при $r = f_1(z)$:

$$v_r = \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} = v_0 \operatorname{tg} \gamma, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \gamma$ – уравнение поверхности тела.

Уравнение поверхности тела выражено через тангенс угла наклона касательной к поверхности движущегося тела (рис. 1), которая может быть определена по формуле $\operatorname{tg} \gamma = f_1'(z)$, $f_1(z) = f_1(-z)$.

2. Равенства нулю составляющей по оси Oy скорости частиц среды на границе полупро-

странства, то есть при $y = -h - f_1(z)$:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial y} = 0.$$

3. Симметрии относительно оси Oz , то есть при $z = 0$:

$$\varphi_1 = 0.$$

Для поиска решения уравнения (2) использован метод источников [7]. Рассматривая функцию $\varphi(r, z)$, удовлетворяющую уравнению (2) и граничному условию (3), решение можно представить в виде

$$\varphi = -\frac{1}{4\pi} \int_{-L}^L \frac{q(\xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - z)^2 + \alpha^2 r^2}}, \quad (4)$$

где $q(z)$ – мощность источника, распределенного по поверхности движущегося тела в пределах $0 < r < f_1(z)$, $-L < z < L$.

Для тонкого осесимметричного тела из формулы (4) по [8] можно утверждать, что:

- при $r \rightarrow 0$ $\frac{\partial \varphi}{\partial r} \rightarrow \frac{q(z)}{2\pi r}$;
- при $0 < z < L$ $q(z) = 2\pi v_0 f_1'(z) f_1(z)$;
- при $-L < z < 0$ $q(z) = -2\pi v_0 f_1'(-z) f_1(-z)$.

Тогда функция $\varphi(r, z)$ приобретает вид

$$\varphi = -\frac{v_0}{2} \left(\int_{-L}^0 \frac{f_1'(-\xi) f_1(-\xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - z)^2 + \alpha^2 r^2}} + \int_0^L \frac{f_1'(\xi) f_1(\xi) d\xi}{\sqrt{(\xi - z)^2 + \alpha^2 r^2}} \right) \quad (5)$$

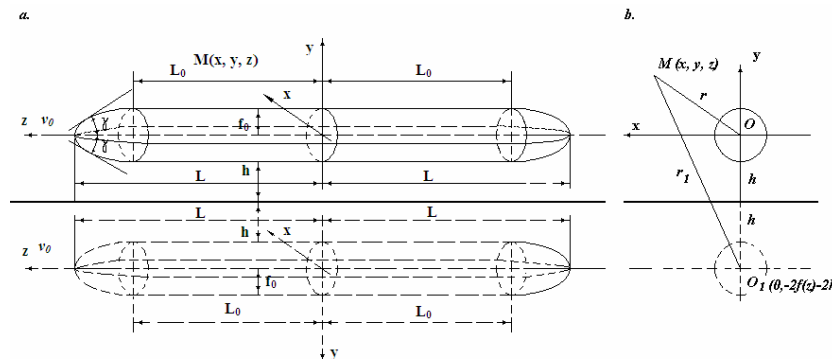


Рис. 1. Схема движения осесимметричного тела в полупространстве (а) и расположения сечений основного и фиктивного тел в плоскости (б)

Fig. 1. Scheme of the axisymmetric body movement in a half-space (a) and the location of sections of the dummy and main bodies in the plane (b)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Учитывая, что $f_1(-\xi) = f_1(\xi)$, $f_1'(-\xi) = -f_1'(\xi)$, уравнение (5) можно представить в следующем виде

$$\varphi = -\frac{v_0}{2} \left(\int_0^L \frac{f_1'(\xi)f_1(\xi)d\xi}{\sqrt{(\xi+z)^2 + \alpha^2 r^2}} - \int_0^L \frac{f_1'(\xi)f_1(\xi)d\xi}{\sqrt{(\xi-z)^2 + \alpha^2 r^2}} \right)$$

При этом функцию $\varphi_1(r, z)$ можно представить в следующем виде

$$\varphi_1 = [\varphi(z, r) + \varphi(z, r_1)]/2, \quad (6)$$

где $r_1 = \sqrt{x^2 + [2f_1(z) + 2h + y]^2}$.

Можно показать, что представленная формулой (6) функция $\varphi_1(r, z)$ удовлетворяет всем условиям рассматриваемой задачи.

Результаты

В качестве примера рассмотрено тело вращения, начальные и конечные участки которого являются оживало (рис. 1). При этом принятые размеры тела равны следующим значениям:

- расстояние от середины движущегося тела до его крайних точек по оси $Oz - L$;
- расстояние от середины движущегося тела до начальной точки изменения формы (очертания) головных частей движущегося тела – L_0 ;

– поперечное сечение движущегося тела рассмотрено в качестве круга радиусом 2 м, которое по площади соответствует поперечному сечению поезда шириной 3,0 м и высотой 4,0 м, т.е. 12 м².

При форме головной и хвостовой части вида оживало функции $f_1(z)$ и $f_1'(z)$ представляются в следующем виде:

– при

$$-L \leq z \leq -L_0,$$

$$f_1 = R[1 - (z + L_0)^2 / (L - L_0)^2],$$

$$f_1' = -2R(z + L_0) / (L - L_0)^2;$$

– при

$$-L_0 \leq z \leq L_0, \quad f_1 = R, \quad f_1' = 0;$$

– при

$$L_0 \leq z \leq L,$$

$$f_1 = R[1 - (z - L_0)^2 / (L - L_0)^2],$$

$$f_1' = -2R(z - L_0) / (L - L_0)^2.$$

Расчеты абсолютной скорости (теоретической) воздушного потока, образуемого движением тела, проводились для случая, когда тело движется с постоянной скоростью (200, 250, 350, 400 км/час) на высоте 2 м от поверхности земли, для точек находящихся на расстоянии 3,55; 6,00; 8,0 и 10 м от оси движущегося тела (скоростного поезда). По результатам расчетов построены графики изменения скорости воздушного потока в акустической среде вдоль движущегося тела на различном расстоянии от него. В качестве примера приведены графики изменения скорости воздушного потока вдоль тела, движущегося со скоростью 200 км/ч, на различных расстояниях от его оси (рис. 2).

Используя закон Бернулли зависимости изменения давления от скорости потока, определены значения избыточного давления, создаваемого воздушным потоком от движущегося тела. Построены зависимости избыточного давления от скорости и расстояния до оси движущегося тела (рис. 3).

Анализ построенных графиков показывает, что распределение давления вдоль движущегося тела, при движении тела со скоростями 160, 200, 250, 350, 400 км/час имеет общую закономерность. Для тела с формой головной и хвостовой части оживало избыточное давление повышается (I зона) и понижается (V зона) с наибольшим скачком (рис. 2). Это объясняется тем, что в головной и хвостовой части тела в виде оживало имеются некоторые зоны, где возникают как избыточные, так и отрицательные давления.

С приближением движущегося тела к точке М с координатами (x, y, z) происходит незначительное повышение избыточного давления (зона I, рис. 2). Максимум избыточного давления в точке М достигается, когда начало движущегося тела находится на этой точке М (зона II, рис. 2). При нахождении середины поезда напротив точки М происходит резкое понижение, а затем повышение избыточного давления. При этом следует отметить, что в точках, расположенных в сечении А-А, вектор скорости меня-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ється и начинает появляться отрицательное давление (зона III, рис. 2). Максимум отрицательного давления достигается, когда конец движущегося тела находится напротив точки М (зона IV, рис. 2). После прохождения поездом точки М происходит постепенное восстановление нормального давления (зона V, рис. 2). Как видно из графика распределения избыточного

давления, максимальное давление имеет взрывной характер, действует на протяжении доли секунд и изменяется в отрицательное давление в течение не более секунды. Таким образом, в течение секунды на человека воздействует избыточное и отрицательное давление с максимальными значениями.

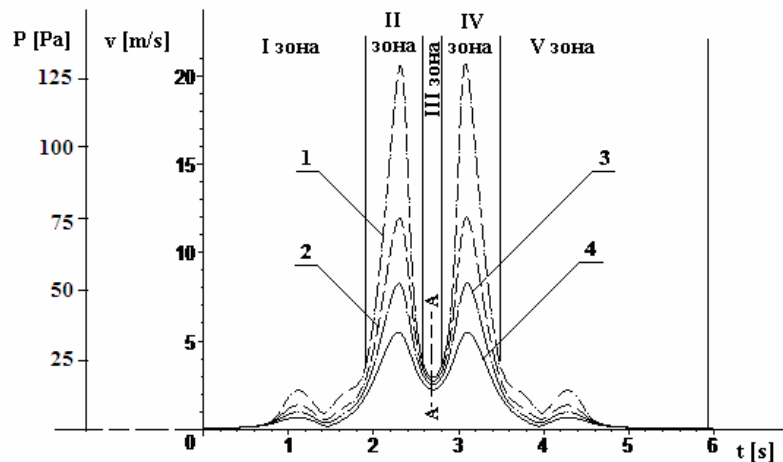


Рис. 2. Графики изменения скорости воздушного потока и избыточного давления вдоль движущегося тела на различных расстояниях:
1 – 3,55 м.; 2 – 6,0 м.; 3 – 8,0 м.; 4 – 10,0 м.

Fig. 2. Charts of the air flow rate and overpressure along the moving body at different distances:
1 – to 3.55 m.; 2 – 6.0 m.; 3 – 8.0 m.; 4 – 10.0 m.

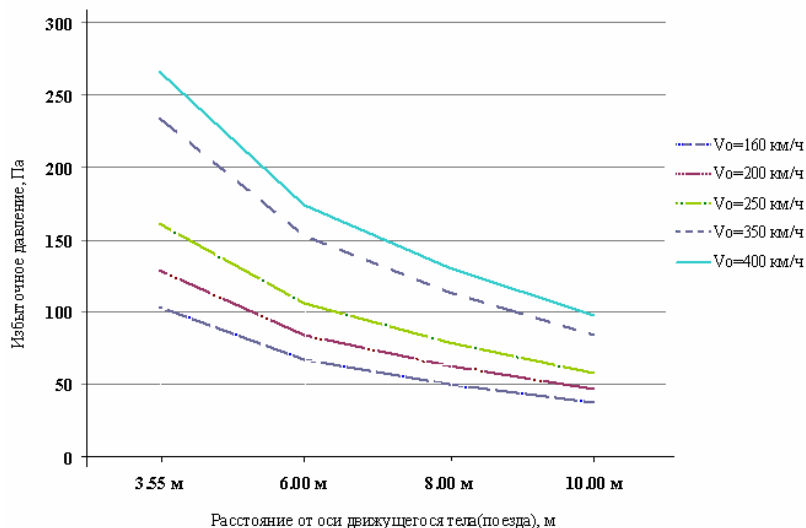


Рис. 3. Изменение избыточного давления в зависимости от скорости и расстояния до оси движущегося тела

Fig. 3. Overpressure changing depending on the velocity and distance to axis of the moving body

Научная новизна и практическая значимость

Впервые теоретические исследования аэродинамики высокоскоростного поезда проведено в качестве осесимметричного тела, с формой головной и хвостовой части в виде оживало в сжимаемой (акустической) среде, движущегося с установившейся скоростью.

Результаты исследований позволяют установить распределение избыточного давления воздушного потока, образуемого вдоль движущегося высокоскоростного поезда.

Выводы

Полученные результаты позволяют установить:

– требования к физико-механическим и прочностным характеристикам отдельных элементов объектов инфраструктуры железных дорог на участках обращения высокоскоростных поездов, подверженных аэродинамическому давлению;

– безопасное минимальное расстояние нахождения людей пути при прохождении высокоскоростного поезда.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Джаббаров, С. Т. Движение тонкого осесимметричного тела в полупространстве, занятом сжимаемым газом / С. Т. Джаббаров // Проблемы механики. – 2016. – Вып. 1. – С. 12–17.
2. Кравец, В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов. Ч. 1 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Заліз. трансп. України. – 2005. – № 2. – С. 52–57.
3. Кравец, В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов. Ч. 2 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Заліз. трансп. України. – 2005. – № 3. – С. 16–20.
4. Кравец, В. В. Аэродинамика частично перекрытого межвагонного пространства скоростного поезда / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. імені акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2005. – Вып. 8. – С. 61–69.
5. Кравец, Е. В. Влияние типа обтекателя на аэродинамическое сопротивление межвагонного пространства скоростного поезда / Е. В. Кравец // Сб. науч. тр. Серия: «Механика» / Днепропетр. нац. ун-т. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 10, т. 1, № 2/1. – С. 113–119.
6. Лазаренко, Ю. М. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении / Ю. М. Лазаренко, А. Н. Капускин // Вестн. ВНИИЖТа. – 2012. – № 4. – С. 11–14.
7. Ламб, Г. Гидродинамика / Г. Ламб. – Москва : ОГИЗ, 1947. – 929 с.
8. Сагомоян, А. Я. Проникание / А. Я. Сагомоян. – Москва : МГУ, 1974. – 299 с.
9. Сюзюмова, Е. М. Исследование воздушных потоков на пассажирской платформе при прохождении поезда / Е. М. Сюзюмова // Вестн. ВНИИЖТа. – 1973. – № 4. – С. 50–52.
10. A Study of the Slipstreams of High-Speed Passenger Trains and Freight Trains / M. Sterling, C. J. Baker, S. C. Jordon, T. Johnson // Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2008. – Vol. 222. – Iss. 1. – P. 177–193. doi: 10.1243/0954409-7jrtr133.
11. Baker, C. J. Keynote lecture – The flow around high speed trains / C. J. Baker // Proc. of the BVAA VI conference. – Milano, Italy, 2008. – P. 34.
12. Baker, C. The flow around high speed trains / C. Baker // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2010. – Vol. 98. – Iss. 6–7. – P. 277–298. doi: 10.1016/j.jweia.2009.11.002.
13. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform / A. Khayrullina, B. Blocken, W. Janssen, J. Straathof // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2015. – Vol. 139. – P. 100–110. doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.019.
14. Diedrichs, B. Studies of Two Aerodynamic Effects on High-Speed Trains: Crosswind Stability and Discomforting Car Body Vibrations Inside Tunnels : Doctoral Thesis, comprehensive summary / Diedrichs Ben ; KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Aeronautical and Vehicle Engineering, Railway Technology. – Stockholm : KTH, 2006. – 74 p.
15. Harvey, S. Lee. The Aerodynamic Effects of Passing Trains to Surrounding Objects and People. Final Report / S. Lee Harvey // April 2009. DOT-VNTSC-FRA-04-05. U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration John A. Volpe National Transportation Systems Center. – Washington, DC, 2009. – P. 257.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

16. Holmes, S. Aerodynamic Effects of High-Speed Passenger Trains on Other Trains. Final Report / S. Holmes, M. Schroeder // DOT-VNTSC-FRA-01-05. U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration John A. Volpe National Transportation Systems Center (September 2000–March 2001). – Washington, DC, 2001. – P. 72.
17. Jordon, S. C. Modelling the response of a standing person to the Slipstream generated by a passenger train / S. C. Jordon, M. Sterling, C. J. Baker // Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2010. – Vol. 223. – Iss. 6. – P. 567–579. doi: 10.1243/0954-4097jrrt281.
18. Kaplunov, S. The calculation of vortex shedding flowpast of fixed and oscillating bodies / S. Kaplunov, N. Valies, A. Samolysov // Parallel and Distributed Computing Systems : Intern. Conf. PDCS (13.03–14.03.2013). – Kharkiv, Ukraine, 2013. – P. 146–151.
19. MacNeill, R. A. Measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains / R. A. MacNeill, S. Holmes, S. Lee Harvey // Proc. of the ASME/IEEE 2002 Joint Rail Conference (23.04–25.04.2002). – Washington, DC, USA, 2002. – P. 57–64. doi: 10.1115/rtd2002-1643.
20. Raghunathan, R. S. Aerodynamics of high-speed railway train / R. S. Raghunathan, H.-D. Kim, T. Setoguchi // Progress in Aerospace Sciences. – 2002. – Vol. 38. – Iss. 6–7. – P. 469–514. doi: 10.1016/s0376-0421(02)00029-5.
21. Tarada, F. Aerodynamic loading of trains passing through tunnels / F. Tarada, Anton F. W. van Himbergen, I. Stieltjes // Railway Engineering Conference (20.06–21.06.2007). – London, UK, 2007. – P. 1–9.
22. The slipstream and wake of a high speed train / C. J. Baker, S. J. Dalley, T. Johnson [et al.] // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2001. – Vol. 215. – Iss. 2. – P. 83–99. doi: 10.1243/0954409011531422.

С. Т. ДЖАББАРОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Будівництво залізниць, колія та колійне господарство», Ташкентський інститут інженерів залізничного транспорту, вул. Адилходжаєва, 1, Ташкент, Узбекистан, 100167, тел. +99 (890) 185 29 34, ел. пошта_saidhon_inbox.ru, ORCID 0000-0002-3798-407X

ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ТИСКУ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ПОЇЗДА

Мета. У науковій роботі необхідно провести дослідження аеродинамічного тиску та розподілу поля швидкостей повітряних потоків уздовж рухомого високошвидкісного поїзда. **Методика.** Дослідження розподілу поля швидкостей навколо рухомого високошвидкісного поїзда зроблено методом імітації його руху як осесиметричного тіла з формою головної та хвостової частин у вигляді оживало в стискуваному (акустичному) середовищі. **Результати.** Визначено значення абсолютної швидкості (теоретичної) повітряного потоку, утвореного рухом тіла (у випадку, коли тіло рухається з постійною швидкістю (200, 250, 350, 400 км/год) на деякій висоті від поверхні землі), для точок, які знаходяться на різній відстані від осі рухомого тіла (швидкісного поїзда). За результатами розрахунків побудовані графіки зміни швидкості повітряного потоку в акустичному середовищі уздовж тіла, що рухається на різній відстані від нього. Використовуючи закон Бернуллі (залежності зміни тиску від швидкості потоку), визначені значення надлишкового тиску, що утворюється повітряним потоком від рухомого тіла. **Наукова новизна.** Вперше теоретичні дослідження аеродинаміки високошвидкісного поїзда проведено на прикладі осесиметричного тіла з формою головної та хвостової частин у вигляді оживало в стискуваному (акустичному) середовищі, що рухається зі сталою швидкістю. Результати досліджень дозволяють встановити розподіл надлишкового тиску повітряного потоку, утвореного уздовж рухомого високошвидкісного поїзда. **Практична значимість.** Отримані автором результати дозволяють встановити: 1) вимоги до фізико-механічних та міцнісних характеристик окремих елементів об'єктів інфраструктури залізниць на дільницях обертання високошвидкісних поїздів, схильних до аеродинамічному тиску; 2) безпечну мінімальну відстань знаходження людей від колій при проходженні високошвидкісного поїзда.

Ключові слова: залізничний транспорт; рух високошвидкісних поїздів; аеродинаміка; повітряний потік; поля швидкостей; аеродинамічний тиск; зона безпеки

S. T. DJABBAROV^{1*}

^{1*}Dep. «Construction of Railways, Track and Track Facilities», Tashkent Institute of Railway Transport Engineers, Adylkhodzhayev St., 1, Tashkent, Uzbekistan, 100167, tel. +99 (890) 185 29 34, e-mail _saidhon_@inbox.ru, ORCID 0000-0002-3798-407X

INVESTIGATION OF AERODYNAMIC PRESSURE DURING THE HIGH-SPEED TRAIN PASSAGE

Purpose. The scientific paper highlights research of aerodynamic pressure and distribution of airflow velocity field along the moving high-speed train. **Methodology.** The study of velocity field distribution around the moving high-speed train is produced by simulating its movement as axially symmetric body with the ogive-shaped head and tail parts in compressible (acoustic) environment. **Findings.** The values of the absolute velocity (theoretical) of air flow generated by the body movement is determined (for the case when the body moves at a constant speed (200, 250, 350, 400 km / h) at a certain height from the ground), for the points located at different distances from the axis of the moving body (high-speed train). The calculations results allowed building the graphs of the air flow velocity in the acoustic environment along the moving body at different distances from it. Using the Bernoulli law (pressure change dependences on the flow velocity), the values of the overpressure generated by the air stream from the moving body were determined. **Originality.** This is the first theoretical study of the aerodynamics of the high-speed train as axially symmetric body with the ogive-shaped head and tail parts in compressible (acoustic) environment, moving with steady speed. The research results allow us to establish the distribution of the excess air flow pressure generated along the moving high-speed train. **Practical value.** The obtained results allows determining of the following parameters: 1) requirements for physical-mechanical and strength characteristics of the individual elements of the railway infrastructure in the areas of high-speed train movement, subject to aerodynamic pressure; 2) minimum distance from the track safe for people location during high-speed train passage.

Keywords: railway transport; movement of high-speed trains; aerodynamics; air flow; velocity field; aerodynamic pressure; safety zone

REFERENCES

1. Dzhabbarov S.T. Dvizheniye tonkogo osesimmetricheskogo tela v poluprostranstve, zanyatom szhimayemym gazom [Movement of thin axially symmetric body in the half-space occupied by compressible gas]. *Problemy mekhaniki – Problems of Mechanics*, 2016, issue 1, pp. 12-17.
2. Kravets V.V., Kravets Ye.V. Aerodinamika vysokoskorostnykh poyezdov. Chast 1 [The aerodynamics of high-speed trains. Part 1]. *Zaloznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2005, no. 2, pp. 52-57.
3. Kravets V.V., Kravets Ye.V. Aerodinamika vysokoskorostnykh poyezdov. Chast 2 [The aerodynamics of high-speed trains. Part 2]. *Zaloznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2005, no. 3, pp. 16-20.
4. Kravets V.V., Kravets Ye.V. Aerodinamika chastichno perekrytogo mezhvagonnogo prostranstva skorostnogo poyezda [Aerodynamics of partially overlapped intercarload space in high-speed trains]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaloznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2005, issue 8, pp.61-69.
5. Kravets Ye.V. Vliyaniye tipa obtekatelya na aerodinamicheskoye soprotivleniye mezhvagonnogo prostranstva skorostnogo poezda [Influence of the fairing type on the aerodynamic drag of inter-car space in the high-speed train]. *Sbornik nauchnykh trudov Seriya: «Mekhanika»* [Proc. Series: «Mechanics»]. Dnepropetrovsk, 2006, issue 10, vol. 1, no. 2/1, pp. 113-119.
6. Lazarenko Yu.M., Kapuskin A.N. Aerodinamicheskoye vozdeystviye vysokoskorostnogo elektropoyezda «Sapsan» na passazhirov na platformakh i na vstrechnyye poyezda pri skreshchenii [Aerodynamic effects of the high-speed electric train «Sapsan» on the passengers at platforms and oncoming trains at crossing]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of All-Russian Research Institute of Railway Transport*, 2012, issue 4, pp.11-14.
7. Lamb G. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow, OGIZ Publ., 1947. 929 p.
8. Sagomonyan A.Ya. *Pronikaniye* [Penetration]. Moscow, MSU Publ., 1974. 299 p.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

9. Syuzumova Ye.M. Issledovaniye vozdushnykh potokov na passazhirskey platforme pri prokhozhenii poyezda [The study of air flows on the passenger platform when the train passes]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of All-Russian Research Institute of Railway Transport*, 1973, no. 4, pp. 50-52.
10. Sterling M., Baker C.J., Jordon S.C., Johnson T. A Study of the Slipstreams of High-Speed Passenger Trains and Freight Trains. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2008, vol. 222, issue 1, pp. 177-193. doi: 10.1243/09544097jrtr133.
11. Baker C.J. Keynote lecture – The flow around high speed trains. Proc. of the BBAA VI conference. Milano, Italy, 2008. p. 34.
12. Baker C. The flow around high speed trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, vol. 98, issue 6-7, pp. 277-298. doi: 10.1016/j.jweia.2009.11.002.
13. Khayrullina A., Blocken B., Janssen W., Straathof J. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, vol. 139, pp. 100-110. doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.019.
14. Diedrichs B. Studies of Two Aerodynamic Effects on High-Speed Trains: Crosswind Stability and Discomforting Car Body Vibrations inside Tunnels: Doctoral Thesis, comprehensive summary. KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Aeronautical and Vehicle Engineering, Railway Technology. Stockholm, KTH Publ., 2006. 74 p.
15. Harvey S. Lee. The Aerodynamic Effects of Passing Trains to Surrounding Objects and People. Final Report. April 2009. DOT-VNTSC-FRA-04-05. U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration John A. Volpe National Transportation Systems Center. Washington, DC, 2009. p. 257.
16. Holmes S., Schroeder M. Aerodynamic Effects of High-Speed Passenger Trains on Other Trains. Final Report. DOT-VNTSC-FRA-01-05. U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration John A. Volpe National Transportation Systems Center (September 2000–March 2001). Washington, DC, 2001. p. 72.
17. Jordon S.C., Sterling M., Baker C.J. Modelling the response of a standing person to the Slipstream generated by a passenger train. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2010, vol. 223, issue 6, pp. 567-579. doi: 10.1243/09544097jrtr281.
18. Kaplunov S., Valies N., Samolysov A. The calculation of vortex shedding flowpast of fixed and oscillating bodies. Parallel and Distributed Computing Systems: Intern. Conf. PDCS (13.03–14.03.2013). Kharkiv, Ukraine, 2013, pp. 146-151.
19. MacNeill R.A., Holmes S., Harvey S. Lee. Measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains. Proc. of the ASME/IEEE 2002 Joint Rail Conference (23.04–25.04.2002). Washington, DC, USA, 2002, pp. 57-64. doi: 10.1115/rtd2002-1643.
20. Raghunathan R.S., Kim H.-D., Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace Sciences*, 2002, vol. 38, issue 6-7, pp. 469-514. doi: 10.1016/s0376-0421(02)00029-5.
21. Tarada F., Anton van Himbergen F. W., Stieltjes I. Aerodynamic loading of trains passing through tunnels. Railway Engineering Conference (20.06–21.06.2007). London, UK, 2007, pp. 1-9.
22. Baker C.J., Dalley S.J., Johnson T., Quinn A., Wright N.G. The slipstream and wake of a high speed train. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2001, vol. 215, issue 2, pp. 83-99. doi: 10.1243/0954409011531422.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. Б. Курганом (Украина); д.т.н., проф. Ш. С. Файзибаевым (Узбекистан)

Поступила в редколлегию: 23.05.2016

Принята к печати: 15.09.2016