

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.024.1-185.4

Р. Ш. ИСАНОВ<sup>1\*</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Высшая математика», Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, ул. Адылходжаева, 1, 100167, Ташкент, Узбекистан, тел. +99 (871) 299 03 26, эл. почта r.isanov@tashiit.uz

## ДВУХСЛОЙНЫЙ ПОТОК ВОЗДУХА ПРИ ОБТЕКАНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЕЗДА

**Цель.** Исследование закономерностей струйных течений воздуха при обтекании высокоскоростного пассажирского поезда. На основе теоретических исследований определить: распределение поля скоростей потока воздуха; давление на верхнем слое двухслойного потока воздуха; давление на границе обоих слоев двухслойного потока воздуха. **Методика.** Для решения задачи на верхнем слое потока воздуха применены методы Жуковского и теории струй идеальной несжимаемой жидкости. Далее для решения уравнения пограничного слоя определено давление на границе обоих слоев, составлено уравнение Навье–Стокса, где учитывается влияние верхнего слоя на нижний. Течение воздуха в верхней области является потенциальным, стационарным, воздух в окрестности считается сжимаемым. **Результаты.** Получено распределение поля скоростей для обоих слоев потока воздуха. Определено давление на верхнем слое двухслойного потока воздуха. **Научная новизна.** Впервые рассмотрена задача о двухслойном потоке воздуха, образованном движением высокоскоростного поезда и состоящем из пограничного слоя над поверхностями вагонов и потока воздуха, где отсутствует свойство вязкости. **Практическая значимость.** Исследованная задача применяется для обеспечения безопасности движения высокоскоростного поезда.

**Ключевые слова:** комплексный потенциал; метод теории струй; пограничный слой; струйное течение воздуха; безопасность движения

### Введение

При движении высокоскоростного поезда образуется поток воздуха. При этом над поверхностью подвижного состава вблизи поезда проявляется свойство вязкости (т.е. трения) воздуха, а с удалением от поверхности вагонов (стенок) свойство вязкости по толщине уменьшается до нуля. Поэтому практически существует двухслойное движение воздуха над поверхностью подвижного состава: нижний слой (пограничный слой) – область  $G_{II}$  с толщиной  $\delta_{II}$ , определяемая в процессе решения с учетом влияния области  $G_Z$  на пограничный слой  $G_{II}$ , и верхний слой (поток идеальной жидкости) – область  $G_Z$  (рис. 1). В этой области  $G_Z$  наряду с твердыми плоскими границами существует свободная поверхность  $DE$ , форма которой неизвестна (определяется в процессе решения). В связи с этим введем каноническую область  $G_0$  (рис. 2). Действительная ось области  $G_0$  ( $\eta = 0$ ) соответствует области течения  $G_Z$ .

В области  $G_{II}$ , которая в основном бывает тонкой, проявляются свойства вязкости воздуха. Это область движения частиц воздуха, где имеет

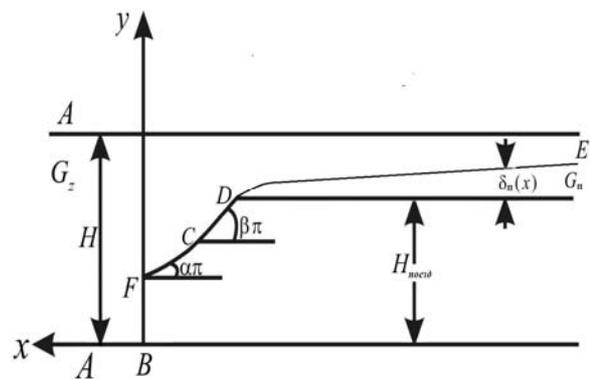


Рис. 1

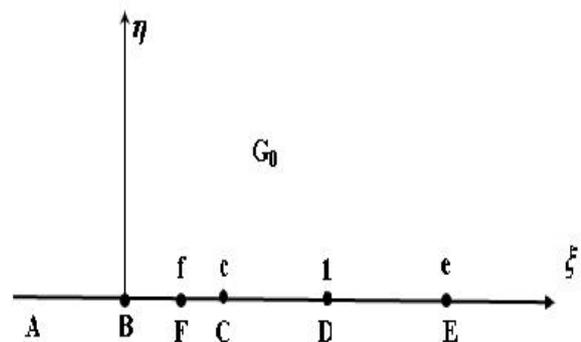


Рис. 2

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

место трение в потоке воздуха с толщиной  $\delta_{II}$ , которая меньше, чем толщина потока воздуха области  $G_Z$ . В области  $G_Z$  трение практически отсутствует, поэтому ее можно описать при помощи уравнения Эйлера. Также при отсутствии кавитации в данной области течение воздуха считаем безвихревым движением частиц воздуха; отсутствует срыв потока воздуха с поверхностей твердых границ вагонов поезда (при постоянстве скорости поезда в области  $G_Z$  движение будет стационарным).

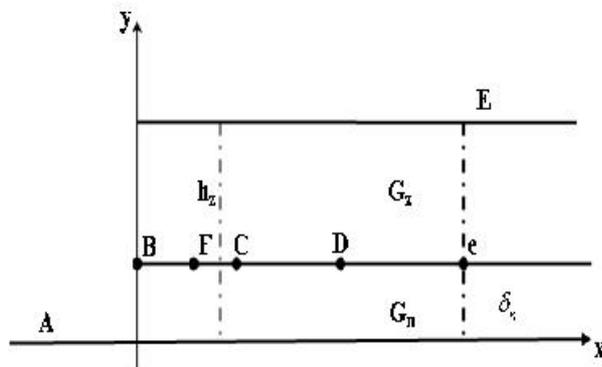


Рис. 3

В работах [8, 16] были рассмотрены задачи обтекания высокоскоростного поезда с заданной конфигурацией. Предположено, что движение частиц воздуха в области  $G_Z$  ограничено твердыми полигональными поверхностями, которые имеют соответствующие углы наклона к горизонтальной поверхности.

Течение плоское  $(x, y)$ , потенциальное, движение стационарное. Эта задача решается при условиях, когда скорость поезда не больше 250 км/ч (жидкость (воздух) несжимаемая); при движении воздуха число Маха составляет  $M < 0,4$ ; плотность частиц воздуха постоянна. Задача решается методами теории струй идеальной несжимаемой жидкости (воздуха) [12], путем введения потенциала скорости  $\phi(x, y)$

$$\vec{V} = \text{grad}\phi(x, y) \quad (1)$$

и функции тока  $\psi(x, y)$ , которая удовлетворяет уравнению неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

в виде

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (3)$$

**Цель**

Исследование закономерностей струйных течений воздуха при обтекании высокоскоростного пассажирского поезда. На основе теоретических исследований определить:

- распределение поля скоростей потока воздуха;
- давление на границе обоих слоев двухслойного потока воздуха.

**Методика**

Для решения задачи на верхнем слое потока воздуха применен метод Жуковского [13]: вводится функция Жуковского и комплексный потенциал

$$W(x) = \phi(x, y) + i\psi(x, y), \quad (4)$$

который является аналитической функцией в области течения  $G_Z$ . Часть области движения идеального воздуха ограничена свободной поверхностью, вдоль которой давление постоянно. Форма свободной поверхности неизвестна, ее определяем в процессе решения равенства  $\psi(x, y) = q$ , где  $q$  – расход потока воздуха области течения  $G_Z$ .

Поскольку углы наклона твердых границ области течения к горизонтальной поверхности заданы, то функцию Жуковского

$$\omega(z) = \ln \frac{V_0}{V} \quad (5)$$

преобразуем в равенство

$$\omega(z) = \ln \frac{V_0}{V} + i\theta. \quad (5^*)$$

В равенстве (5\*)  $\vec{V} = u - iv$ , здесь  $u, v$  – компоненты вектора скорости частиц воздуха к горизонту ( $u$  – по плоскости движения поезда,  $v$  – ортогонально к горизонтальной поверхности). Так как  $u = V \cos \theta$ ,  $v = V \sin \theta$ ;  $V = \sqrt{u^2 + v^2}$  – модуль скорости,  $\theta$  – угол наклона вектора скорости.

Задача сводится к установлению закона движения в области  $G_Z$ ,  $z = x + iy$ .

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В работе [1] приведены граничные условия для функций (5) по заданным значениям угла наклона вектора скорости в области  $G_Z$ . Пользуясь интегральной формулой Кристоффеля–Шварца для аналитических функций, получена следующая интегральная формула:

$$\omega_1(\zeta) = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^N \int_{\alpha_k}^{\beta_k} \frac{\theta_k d\gamma}{\sqrt{\gamma - a_k} (\gamma - \zeta)}, \quad (6)$$

где  $N$  – число твердых границ. Значения  $\alpha_k, \beta_k$  подставляются для каждой границы в соответствии с рис. 1, 2.

$$\omega_1(\zeta) = \frac{\omega(\zeta)}{\sqrt{\zeta - 1} \sqrt{\zeta - e}}. \quad (7)$$

Интегрируя (6) по  $\gamma$  в установленных границах и учитывая, что функция  $\omega_1(\zeta)$  аналитическая в области  $G_0$ , получим выражения для компонентов потенциала функции Жуковского как в работе [16]:

$$\omega(\zeta) = \sqrt{\zeta - 1} \sqrt{\zeta - e} \omega_1(\zeta). \quad (8)$$

Следовательно,  $\ln \frac{V_0}{\bar{V}} = \ln F(\zeta)$ , где

$\bar{V} = \frac{V_0}{F(\zeta)}$  – сопряженная комплексная скорость частиц воздуха в плоскости  $G_0$ . Так как скорость на свободной поверхности  $V_0 = |F(e, 0)|$ , то получим:

$$\bar{V} = \frac{|F(e, 0)|}{F(\zeta)}. \quad (9)$$

Для получения поля скоростей в области  $G_Z$  составим уравнения распределения скорости. Учитывая равенство (4), получим:

$$\frac{dw(z)}{dz} = \bar{V}, \quad (10)$$

$$\frac{dw(\zeta)}{d\zeta} = \frac{q}{\pi} \frac{1}{(e - \zeta)}, \quad (11)$$

где  $\bar{V}$  – сопряженная комплексная скорость ( $\bar{V} = u - iv$ );  $q$  – расход потока воздуха в об-

ласти течения  $G_Z$  (в точке  $A$  источник, в точке  $E$  – сток расходом  $q$ );  $G_0$  – область течения  $G_Z$  (источником с расходом  $q$  ( $q = V_n H$ ) является точка  $A(x \rightarrow \infty)$ , стоком – точка  $E$  с тем же расходом  $q$ ). Действительная ось  $ADE$  соответствует области течения  $G_Z$ . Скорость на свободной поверхности  $V_0 = |F(e, 0)|$ .

Для установления закона изменения скорости воспользуемся равенством

$$dz = \frac{dz}{dw} \frac{dw}{d\zeta} d\zeta = \int \frac{d\zeta}{(e - \zeta) F(\zeta)} \quad (12)$$

и получим:

$$z(\zeta) = \frac{H}{\pi} \int_0^\zeta \frac{d\gamma}{(e - \gamma) F(\gamma)}. \quad (13)$$

Равенства (9)–(11) и (13) дают распределения скоростей в области движения  $G_Z$  в каноническом виде

$$\bar{V}(z) = \{z(\zeta), F(\zeta) V_0\}.$$

При обтекании высокоскоростного поезда образуется течение воздуха в окрестности вагона. Воздух имеет коэффициент кинематической вязкости

$$|\nu(x, y)| \ll 1 (0,104 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}).$$

В связи с этим на поверхности поезда (в зависимости от его конфигурации) наблюдается двухслойное движение воздуха (рис. 4). Над поверхностью вагонов будет пограничный слой  $G_{II}$ , где воздух имеет свойство трения. А над поверхностью пограничного слоя  $G_{II}$  течет поток воздуха, в котором отсутствует трение и свойство вязкости (считается идеальной жидкостью), который обозначим  $G_Z$ . Течение воздуха в области  $G_Z$  является потенциальным, стационарным; воздух в окрестности считается сжимаемой жидкостью. В области  $G_{II}$  воздух имеет свойство вязкости. Толщина пограничного слоя  $\delta_{II} = 5,83 \sqrt{\frac{\nu L}{V_{\text{поезд}}}}$ ,

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

где  $L$  – длина поезда,  $V_{\text{поезд}}$  – скорость поезда. При образовании пограничного слоя, для которого имеем уравнение Навье–Стокса, толщина которого  $\delta_{\Pi}$  меньше, чем толщина области  $G_Z$ :

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (14)$$

где  $\mu, \nu$  – коэффициенты динамической и кинематической вязкости воздуха.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

с учетом уравнения (14) запишется в виде

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (16)$$

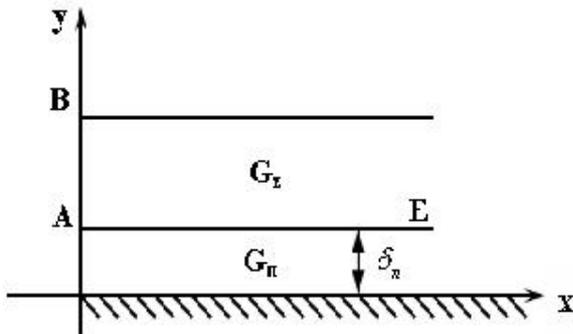


Рис. 4

На рис. 4  $AE$  является границей раздела областей  $G_Z$  и  $G_{\Pi}$  потока воздуха; движение частиц воздуха является стационарным, поскольку поезд движется с постоянной скоростью.

### Результаты

Уравнение неразрывности (15) показывает, что в области пограничного слоя  $G_{\Pi}$  скорость частиц воздуха будет меньше (за счет трения  $\frac{1}{\sqrt{Re}}$ ), чем скорость в области  $G_Z$ , следовательно, в этой области число Маха  $M \ll 1$ .

Последнее слагаемое в уравнении (16) можно записать в виде:  $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \mu = \frac{\partial}{\partial y} \left( -\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)$ , где

$\mu \frac{\partial u}{\partial y} = \tau_{xy}$  – касательное напряжение в области  $G_{\Pi}$ , где  $\rho = \text{const}$ . Поскольку толщина пограничного слоя мала, то касательное напряжение постоянно по толщине пограничного слоя ( $\tau_{xy} = \text{const}$ ). Поэтому производная от касательного напряжения равна нулю  $\left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \right)$ .

Так как в области  $G_{\Pi}$  поперечная скорость  $v$  намного меньше по сравнению с продольной скоростью  $u$ , предполагаем  $v = 0$ . Тогда слагаемое  $\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}$  уравнения (16) равно нулю. Частицы воздуха становятся малыми, поэтому давление по  $G_{\Pi}$  постоянно.

Уравнение Навье–Стокса (14) при вышеизложенных предположениях имеет следующий вид:

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

С учетом результатов, полученных в работах [7, 15], имеем:

$$p = \text{const} \Rightarrow \frac{n-1}{n} V^2 = \text{const}.$$

Течение воздуха плоское потенциальное, стационарное (когда скорость поезда  $V_{\Pi} = \text{const}$ ).

В области  $G_Z$  воздух сжимаем, поэтому плотность и давление переменны. Процесс является политропическим  $p = p_0 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n$ . Учитывая интеграл Бернулли, функция давления имеет вид

$$\Omega(x, y) = \int \frac{dp}{\rho} = \frac{n}{n-1} \frac{p}{\rho} + \text{const}.$$

Отсюда получим:

$$p = c \rho \frac{n-1}{n} - \frac{V^2(x, y) (n-1)}{2n}. \quad (17)$$

Введем безразмерные переменные  $u = V^0 \hat{u}$ ,

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$x = L\hat{x}$ , зададим скорость  $u^* = u(0)$ ,  $\lambda^* = \frac{v}{V^0 L}$ .

При условии, что  $0 \leq y \leq \delta_{II}$  на границе раздела областей  $G_Z$  и  $G_{II}$  (рис. 5), давление  $\frac{\partial p}{\partial x}$  (учитывая интеграл Бернулли) в области  $G_Z$  определяется равенством:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{V^2(\hat{x}, \delta_{II})}{2} \right), \quad (18)$$

$$p_0 = \rho V_0^2(\hat{x}_0, \delta_{II}) = \text{const}.$$

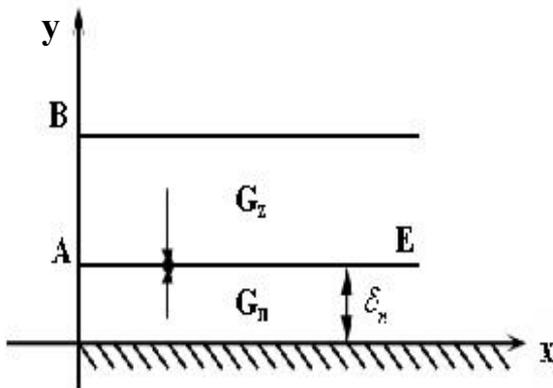


Рис. 5

Учитывая вышеизложенное, уравнение (16) примет вид:

$$\frac{\partial \hat{u}^2}{\partial \hat{x}} = -\frac{n-1}{n} \frac{d}{d\hat{x}} \left( \frac{V^2(\hat{x}, \delta_{II})}{2} \right) + \mu \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2}, \quad (19)$$

$$\frac{1}{2} \rho \frac{\partial \hat{u}^2}{\partial \hat{x}} + \frac{n-1}{n} \rho \frac{\partial}{\partial \hat{x}} V^2(\hat{x}, \delta_{II}) = \mu \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2}, \quad (20)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \hat{u}^2}{\partial \hat{x}} + \frac{n-1}{n} \frac{\partial}{\partial \hat{x}} V^2(\hat{x}, \delta_{II}) = \lambda^* \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2}, \quad (21)$$

где  $\lambda^* = \frac{v}{\hat{u}_0 L}$ .

Уравнение (21) после интегрирования примет вид

$$\hat{u}^2(\hat{x}) - \hat{V}_0^2(\hat{x}, \delta_{II}) = \lambda^* \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}}, \quad (22)$$

где  $\hat{V}_0^2 = u^2(\hat{x}_0, \delta_{II})$ ,

$$\frac{1}{\lambda^*} \int \frac{d\hat{u}}{\hat{u}^2(\hat{x}) - \hat{V}_0^2(\hat{x}, \delta_{II})} = \int d\hat{x}, \quad (23)$$

$$\hat{x} = \frac{1}{2\lambda^* V_0} \ln \left| \frac{\hat{u} - V_0}{\hat{u} + V_0} \right|, \quad (24)$$

откуда находим:

$$\hat{u} = \frac{2V_0}{1 - e^{\lambda^* 2V_0 \hat{x}}} - V_0. \quad (25)$$

Точка  $\hat{x} = x_0 = 0$  является точкой отрыва пограничного слоя.

**Научная новизна и практическая значимость**

Впервые рассмотрена задача о двухслойном потоке воздуха, образованном движением высокоскоростного поезда и состоящем из пограничного слоя над поверхностями вагонов и потока воздуха, где отсутствует свойство вязкости. Применяется для обеспечения безопасности движения высокоскоростного поезда.

**Выводы**

Полученные результаты дают возможность определить распределение поля скоростей потока воздуха в обоих слоях двухслойного потока воздуха.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Бютнер, Э. Н. Динамика приповерхностного слоя воздуха / Э. Н. Бютнер. – Л. : Гидрометеоиздат, 1978. – 157 с.
2. Задача об уносе твердых частиц с земной поверхности образованной движением высокоскоростного поезда / Ш. С. Файзыбаев, А. А. Хамидов, Р. Ш. Исанов, Б. Б. Егамбердиев // Безопасность движения поездов : тр. конф. – М. : МИИТ, 2012. – 44 с.
3. Исанов, Р. Ш. Задача об уносе твердых частиц с земной поверхности потоком воздуха при движении высокоскоростного поезда / Р. Ш. Исанов // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : междунар. конф. – Омск : ОМГУПС, 2012. – С. 270–274.
4. Кравец, В. В. Аэродинамика частично перекрытого межвагонного пространства скоростного поезда / В. В. Кравец, Е. В. Кравец //

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2005. – Вип. 8. – С. 61–69.
5. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Физматгиз: Наука, 1973. – 804 с.
  6. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. В 2 т. Т. 1 / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – 464 с.
  7. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. В 2 т. Т. 2 / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – 360 с.
  8. Плоские задачи о струйном обтекании высокоскоростного поезда / А. А. Хамидов, В. Н. Балабин, Р. Ш. Исанов, Н. В. Яронова // Проблемы механики. – 2013. – № 1–2. – С. 11–15.
  9. Седов, Л. И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1966. – 448 с.
  10. Файзыбаев, Ш. С. Исследования по разработке методов динамического расчета деталей машин при импульсном нагружении их поверхностных слоев / Ш. С. Файзыбаев, И. Ю. Соболева, З. Г. Мухамедова // Вестн. ТашИИТа. – 2008. – № 3. – С. 35–37.
  11. Файзыбаев, Ш. С. Обоснование методики экспериментальной оценки пластических деформаций на поверхности упрочняемого банджа / Ш. С. Файзыбаев, И. Ю. Соболева, З. Г. Мухамедова // Проблемы механики. – 2011. – № 3–4. – С. 54–56.
  12. Файзыбаев, Ш. С. Моделирование нагружения поверхности контакта колеса и рельса / Ш. С. Файзыбаев // Вестн. ТашИИТа. – 2010. – № 1. – С. 32–35.
  13. Хамидов, А. А. Плоские и осесимметричные задачи о струйном течении идеальной сжимаемой жидкости / А. А. Хамидов. – Ташкент : Фан, 1978. – 137 с.
  14. Хамидов, А. А. Задача об обтекании вагона потоком идеальной сжимаемой жидкости / А. А. Хамидов, Р. Ш. Исанов, М. И. Рузматов // Проблемы наземных трансп. систем : материалы науч.-техн. конф. – Ташкент : ТашИИТ, 2008. – С. 211–213.
  15. Хамидов, А. А. Расчет задачи об уносе твердых частиц движением высокоскоростного поезда // А. А. Хамидов, Р. Ш. Исанов, Б. Б. Егамбердиев // Вестн. ТашИИТа. – 2012. – № 3. – С. 32–35.
  16. Хамидов, А. А. Задача о движении частиц воздуха в окрестности скоростного и высокоскоростного пассажирского поезда / А. А. Хамидов, Р. Ш. Исанов, Б. Б. Егамбердиев // Вестн. ТашИИТа. – 2011. – № 3. – С. 50–55.
  17. Хамидов, А. А. Задача об уносе твердых частиц потоком воздуха при движении высокоскоростного поезда и расчеты для разных форм частиц / А. А. Хамидов, Р. Ш. Исанов // Ресурсосберегающие технологии на ж.-д. трансп. : тр. конф. (05.12-06.12. 2012). – Ташкент : ТашИИТ, 2012. – С. 13–18.
  18. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1969. – 735 с.
  19. A full-scale experimental and modeling study of ballast flight under high-speed trains / D. Quinn, M. Hayward, C. J. Baker et al. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transport. – 2010. – Vol. 224, № 2. – P. 61–74.
  20. Baker, C. The flow around high speed trains / C. Baker // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2010. – Vol. 98, № 6. – P. 277–298.
  21. Muld, T. W. Flow structures around a high-speed train extracted using Proper Orthogonal Decomposition and Dynamic Mode Decomposition / T. W. Muld, G. Efraimsson, D. S. Henningson // Computers & Fluids. – 2012. – № 57. – P. 87–97.
  22. Raghunathan, R. S., Aerodynamics of high-speed railway train / R. S. Raghunathan, H. D. Kim, T. Setoguchi // Progress in Aerospace sciences. – 2002. – Vol. 38, № 6. – P. 469–514.

Р. Ш. ИСАНОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вища математика», Ташкентський інститут інженерів залізничного транспорту, вул. Адилходжаєва, 1, 100167, Ташкент, Узбекистан, тел. +99 (871) 299 03 26, ел. пошта r.isanov@tashiit.uz

## ДВОШАРОВИЙ ПОТІК ПОВІТРЯ ПРИ ОБТІКАННІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ПОЇЗДА

**Мета.** Дослідження закономірностей струминних течій повітря при обтіканні високошвидкісного пасажирського поїзда. На основі теоретичних досліджень визначити: розподіл поля швидкостей потоку повітря; тиск на верхньому шарі двошарового потоку повітря; тиск на межі обох шарів двошарового потоку повітря. **Методика.** Для розв'язання задачі на верхньому шарі потоку повітря застосовано методи Жуковського й теорії струменів ідеальної нестисливої рідини. Далі для розв'язання рівняння приграничного шару визна-

© Р. Ш. Исанов, 2013

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

чено тиск на межі обох шарів, складено рівняння Нав'є–Стокса, де враховується вплив верхнього шару на нижній. Течія повітря у верхній області є потенціальною, стаціонарною, повітря в околі вважається стисливим. **Результати.** Отримано розподіл поля швидкостей для обох шарів потоку повітря. Визначено тиск на верхньому шарі двошарового потоку повітря. **Наукова новизна.** Вперше розглянуто задачу про двошаровий потік повітря, утвореного рухом високошвидкісного поїзда, що складається з приграничного шару над поверхнями вагонів і потоку повітря, де відсутня властивість в'язкості. **Практична значимість.** Досліджена задача застосовується для забезпечення безпеки руху високошвидкісного поїзда.

*Ключові слова:* комплексний потенціал; метод теорії струменів; приграничний шар; струминна течія повітря; безпеку руху

R. SH. ISANOV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Higher Mathematics», Tashkent Institute of Railway Transport Engineers, Adylkhodzhayev Str., 1, 100167, Tashkent, Uzbekistan, tel. +99 (871) 299 03 26, e-mail r.isanov@tashiit.uz

## DOUBLE LAYER AIR CURRENT DURING THE HIGH SPEED TRAIN FLOW-AROUND

**Purpose.** Investigation of the jet stream mechanism during the high-speed passenger train flow around. On the basis of theoretical studies to determine the distribution of air flow velocity field, the pressure on the upper layer of the double layer air current, the pressure at the boundary of both layers of double-layer air current. **Methodology.** To solve the problem on the top layer of air current the Zhukovsky method and the method of theory of ideal incompressible fluid jets were applied. Then to solve the boundary layer equations the pressure at the boundary of both layers was determined, the Navier - Stokes equation, which takes into account the influence of the top layer on the bottom layer was set up. Airflow in the upper region is a potential, stationary; the air in the vicinity is considered as the compressible one. **Findings.** The distribution of the velocity field for both layers of air current was obtained. The pressure on the upper layer of the double layer air flow was defined. **Originality.** The problem of a double layer air current formed by the high-speed train movement consisting of the boundary layer above the car surfaces and the air current with no viscosity was studied for the first time. **Practical value.** The problem under study is used to provide the safety of high-speed train traffic.

*Keywords:* complex potential; the method of the jet theory; boundary layer; jet air current; traffic safety

### REFERENCES

1. Byutner E.N. *Dinamika pripoverkhnostnogo sloya vozdukha* [Dynamics of near surface air layer]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978. 157 p.
2. Fayzybayev Sh.S., Khamidov A.A., Isanov R.Sh., Yegamberdiyev B.B. Zadacha ob unose tverdykh chastits s zemnoy poverkhnosti obrazovannoy dvizheniyem vysoko-skorostnogo poyezda [The problem of fly ash particulates entrainment from the earth surface formed by the movement of high-speed train]. *Trudy konferentsii "Bezopasnost dvizheniya poyezdov"* [Proc. of the Conf. "Train Traffic Safety"]. Moscow, 2012, pp. 44.
3. Isanov R.Sh. Zadacha ob unose tverdykh chastits s zemnoy poverkhnosti potokom vozdukha pri dvizhenii vysokoskorostnogo poyezda [The problem of fly ash particulates entrainment from the earth surface during the high-speed train movement]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya "Ekspluatatsionnaya nadezhnost lokomotivnogo parka i povysheniye effektivnosti tyagi poyezdov"* [Int. Conf. "The operational reliability of the locomotive fleet and improving the train traction"]. Omsk, 2012, pp. 270-274.
4. Kravets V.V., Kravets Ye.V. Aerodinamika chastichno perekrytogo mezhvagonnogo prostranstva skorostnogo poyezda [Aerodynamics of partially overlapped an inter-car space of the high-speed train]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2005, issue 8, pp. 61-69.
5. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Moscow, Fizmatgiz, Nauka Publ., 1973. 804 p.
6. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred. Tom 1* [Multiphase medium dynamics. Vol. 1]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 464 p.
7. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred. Tom 2* [Multiphase medium dynamics. Vol. 2]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 360 p.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Khamidov A.A., Balabin V.N., Isanov R.Sh., Yaronova N.V. Ploskiye zadachi o struynom obtekanii vysokoskorostnogo poyezda [Plane problems of jet flow around of the high-speed train]. *Problemy mekhaniki – Problems of Mechanics*, 2013, no. 1-2, pp. 11-15.
9. Sedov L.I. *Ploskiye zadachi gidrodinamiki i aerodinamiki* [Plain problems of the hydrodynamics and aerodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 448 p.
10. Fayzybayev Sh.S., Soboleva I.Yu., Mukhamedova Z.G. Issledovaniya po razrabotke metodov dinamicheskogo rascheta detaley mashin pri impulsnom nagruzhении ikh poverkhnostnykh sloev [Researches on the development of methods for the dynamic analysis of machine parts under impact loading of the surface layers]. *Vestnik Tashkentskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of Tashkent Institute of Railway Transport Engineers], 2008, no. 3, pp. 35-37.
11. Fayzybayev Sh.S., Soboleva I.Yu., Mukhamedova Z.G. Obosnovaniye metodiki eksperimentalnoy otsenki plasticheskikh deformatsiy na poverkhnosti uprochnyayemogo bandazha [Methodology justification of experimental evaluation of plastic deformations on the surface of the reinforcing band]. *Problemy mekhaniki – Problems of Mechanics*, 2011, no. 3-4, pp. 54-56.
12. Fayzybayev Sh.S. Modelirovaniye nagruzheniya poverkhnosti kontakta koleasa i relsa [Loading simulation of the wheel and rail contact surface]. *Vestnik Tashkentskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of Tashkent Institute of Railway Transport Engineers], 2010, no. 1, pp. 32-35.
13. Khamidov A.A. *Ploskiye i osesimmetrichnyye zadachi o struynom techenii idealnoy szhimayemoy zhidkosti* [Plane and axially symmetric problems of the jet stream of ideal compressible fluid]. Tashkent, Fan Publ., 1978. 137 p.
14. Khamidov A.A., Isanov R.Sh., Ruzmatov M.I. Zadacha ob obtekanii vagona potokom idealnoy szhimayemoy zhidkosti [The problem of the flow around the car by the ideal compressible fluid flow]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Problemy nazemnykh transportnykh sistem”* [Proc. of Sci. and Technical Conf. “Problems of ground transport systems”]. Tashkent, 2008, pp. 211-213.
15. Khamidov A.A., Isanov R.Sh., Yegamberdiyev B.B. Raschet zadachi ob unose tverdykh chastits dvizheniyem vysokoskorostnogo poyezda [Calculation of the problem of fly ash particles entrainment by movement of the high-speed train]. *Vestnik Tashkentskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of Tashkent Institute of Railway Transport Engineers], 2012, no 3. pp. 32-35.
16. Khamidov A.A., Isanov R.Sh., Yegamberdiyev B.B. Zadacha o dvizhenii chastits vozdukh v okrestnosti skorostnogo i vysokoskorostnogo passazhirskogo poyezda [The problem of motion of air particles in the vicinity of high-speed passenger train]. *Vestnik Tashkentskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of Tashkent Institute of Railway Transport Engineers], 2011, no. 3, pp. 50-55.
17. Khamidov A.A., Isanov R.Sh. Zadacha ob unose tverdykh chastits potokom vozdukh pri dvizhenii vysokoskorostnogo poyezda i raschety dlya raznykh form [The problem of fly ash particles entrainment by movement of the high-speed train and calculations for different forms of particles]. *Trudy konferentsii “Resursosberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte”* [Proc. of the Conf. “Resource-saving technologies on the railway transport”]. Tashkent, 2012. pp. 13-18.
18. Shlikhting G. *Teoriya pogranychnoy sloya* [Boundary layer theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 735 p.
19. Quinn D., Hayward M., Baker C.J., Schmid F., Priest J.A., Powrie W. A full-scale experimental and modeling study of ballast flight under high-speed trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transport*, 2010, vol. 224, no. 2, pp. 61-74.
20. Baker C. The flow around high speed trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, vol. 98, no. 6, pp. 277-298.
21. Muld T.W., Efraimsson G., Henningson D.S. Flow structures around a high-speed train extracted using Proper Orthogonal Decomposition and Dynamic Mode Decomposition. *Computers & Fluids*, 2012, no. 57, pp. 87-97.
22. Raghunathan R.S., Kim H.D., Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace sciences*, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 469-514.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. С. В. Мямлиным (Украина); д.т.н. В. А. Габринцом (Украина)

Поступила в редколлегию 05.06.2013.

Принята к печати 08.08.2013.