УДК 532.516

**А. А. ПРИХОДЬКО, М. С. АРСЕНЮК**

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ОТНОСИТЕЛЬНО ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для исследования обтекания корпуса высокоскоростного транспортного средства вблизи путевой структуры применяются трехмерные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса. При замыкании системы уравнений использовалась модель турбулентности SST. Численное решение системы исходных уравнений выполнено методом контрольных объемов. Представлены распределения давления и коэффициента трения, предельные линии тока на поверхности корпуса транспортного средства. Выполнена визуализация пространственной структуры потока. В потоке за телом наблюдается система из двух поперечных и двух продольных, противоположно вращающихся вихрей. Анализируется влияние угла установки и расстояния до путевой структуры на аэродинамические характеристики высокоскоростного транспортного средства.

Для дослідження обтікання корпусу високошвидкісного транспортного засобу поблизу шляхової структури застосовуються тривимірні осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є–Стокса. При замиканні системи рівнянь використовувалася модель турбулентності SST. Чисельне розв'язування системи вихідних рівнянь виконано методом контрольних об'ємів. Наведені розподіли тиску, коефіцієнта тертя, граничні лінії течії на поверхні корпусу транспортного засобу. Виконана візуалізація просторової структури потоку. У потоці за тілом спостерігається система з двох поперечних і двох подовжніх вихорів, що обертаються в протилежних напрямах. Аналізується вплив кута установки та відстані до шляхової структури на аеродинамічні характеристики високошвидкісного транспортного засобу.

The flow around high-speed vehicle near the track structure was calculated using the three-dimensional Reynolds averaged Navier–Stokes equations. For the turbulence simulation the SST model was used. The finite volume method was used for the numerical solution of the RANS equations. The distributions of the pressure and the coefficient of friction as well as limiting surface streamlines on surfaces of the vehicle body are presented. The 3D flow structure is visualized. The system of two transverse and two longitudinal, counter-rotating vortices is observed in the flow behind the body. The influence of the angle of setting and the distance to the track structure on aerodynamic characteristics of the high-speed vehicle is analyzed.

***Ключевые слова:*** *транспортное средство, аэродинамика, уравнения Навье–Стокса, метод контрольного объема, аэродинамические коэффициенты.*

**Введение.** В настоящее время на смену классической высокоскоростной технологии на принципе «колесо–рельс» с электрическим приводом приходит новая технология с использованием эффекта магнитной левитации с линейным тяговым двигателем. Высокоскоростные наземные транспортные средства на магнитном подвесе (ВСНТ) в процессе движения не касаются путевого полотна и развивают большие скорости – до 500 – 600 км/ч [1]. Высокие скорости транспортных средств и близость путевой структуры требуют учета влияния процессов аэродинамики на устойчивость и безопасность движения. Выбор компоновки высокоскоростного транспортного средства должен выполняться на основе решения связанной задачи аэродинамики, электродинамики и динамики движения ВСНТ [1, 2].

Дороговизна и сложность экспериментального исследования аэродинамики поездов выводят на первый план численное моделирование обтекания корпуса ВСНТ [2 – 4].

На аэродинамические характеристики ВСНТ оказывают существенное влияние геометрия корпуса, наличие близко расположенной путевой структуры, величина угла установки и расстояния до путевой структуры.

Целью настоящей работы является численное исследование влияния угла установки и расстояния до путевой структуры на аэродинамические характеристики ВСНТ.

**Постановка задачи. Численная методика.** Для численного моделирования применяются нестационарные трехмерные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса в векторно-интегральной форме [4]. При замыкании системы уравнений использовалась модель турбулентности SST [5]:

$$\iiint\limits_V \frac{\partial q}{\partial t} dV + \iint\limits_S (F - F_v)\cdot \overline{n} dS = \iiint\limits_V H dV .$$

Здесь

$$q = \begin{bmatrix} ° \\ °u \\ °v \\ °w \\ e \\ °k \\ °µ \end{bmatrix}; \quad F\cdot\overline{n} = \begin{bmatrix} °U_n \\ °U_n u + n_x p_t \\ °U_n v + n_y p_t \\ °U_n w + n_z p_t \\ (e+p)U_n \\ °U_n k \\ °U_n µ \end{bmatrix}; \quad F_v\cdot\overline{n} = \frac{1}{\mathrm{Re}}\begin{bmatrix} 0 \\ f_{2v} \\ f_{3v} \\ f_{4v} \\ f_{5v} \\ «_k k_n \\ «_µ µ_n \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ H_k \\ H_µ \end{bmatrix},$$

где *u, v, w* − компоненты вектора скорости в направлениях *x, y, z*; $p_t = p + p_k$; $°$ , $p$ , $e$ , $k$ , $µ$ − плотность, давление, полная энергия единицы объема газа, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации; $p_k$ − давление, обусловленное турбулентными пульсациями; $U_n = n_x u + n_y v + n_z w$ − нормальная скорость; $\overline{n}$ − вектор нормали; $f_{2v} = «\left(u_n + \frac{1}{3} n_x U_n\right)$; $f_{3v} = «\left(v_n + \frac{1}{3} n_y U_n\right)$; $f_{4v} = «\left(w_n + \frac{1}{3} n_z U_n\right)$; $f_{5v} = \frac{ª}{\mathrm{Pr}(¥ - 1)}\left(a^2\right)_n + \frac{«}{2}\left(u^2 + v^2 + w^2\right)_n + \frac{«}{3} UU_n$; $«$ , $ª$ – коэффициенты эффективной вязкости и теплопроводности; $«_k$ , $«_µ$ , $H_k$ , $H_µ$ − соответственно эффективные коэффициенты и источниковые члены в уравнениях переноса характеристики турбулентности; $a$ − скорость звука; ¥ − показатель адиабаты.

Система уравнений дополняется уравнением состояния

$$\mathrm{p} = \mathrm{p}(£, °),$$

где £ – внутренняя энергия, которая определяется соотношением

$$£ = \frac{e}{°} - \frac{1}{2}\left(u^2 + v^2 + w^2\right).$$

Система уравнений записана в дивергентном виде и при замене дискретным аналогом будет обладать свойствами сохранения массы, импульса и энергии с соответствующей точностью в каждой расчетной точке.

*Начальные и граничные условия.* В качестве начальных условий задавались параметры невозмущенного потока.

На бесконечности задавались параметры набегающего потока. На поверхности транспортного средства и путевой структуре задавались условия прилипания.

*Численная методика.* Численное решение системы исходных уравнений получено методом контрольных объемов.

*Дискретизация расчетной области.* Расчеты выполнены для корпуса ВСНТ с геометрическими размерами, указанными на рис. 1, на гексаэдральной многоблочной сетке, состоящей из 3,3 млн. узлов. Все геометрические параметры обезразмерены на длину корпуса. Минимальный шаг сетки составлял $5\times10^{-7}$. Средняя толщина вязкого подслоя по корпусу составляла $y^{+}$=0,88.

Длина расчетной области составляла 5,5; ширина – 1,85; высота – 0,9.

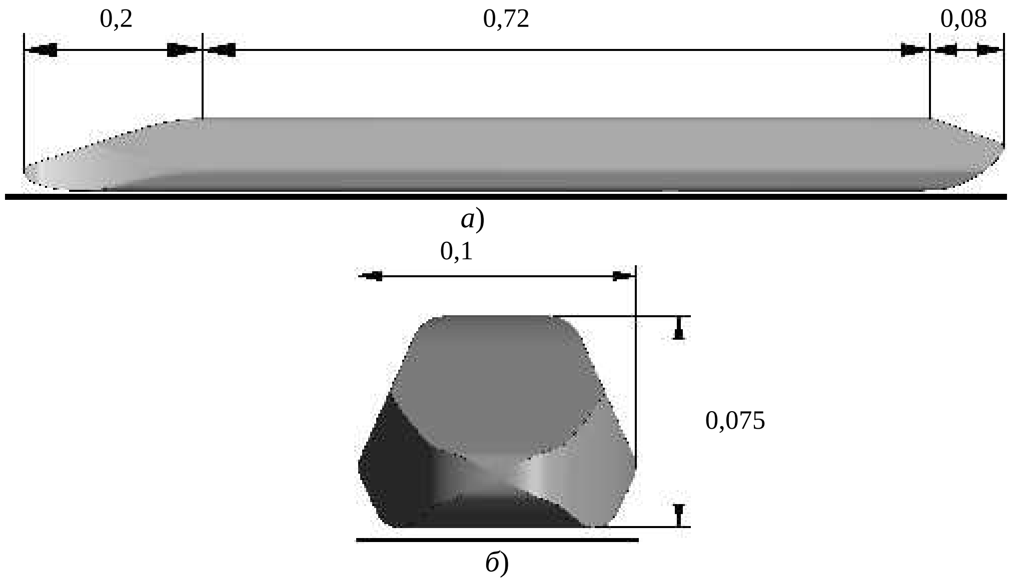
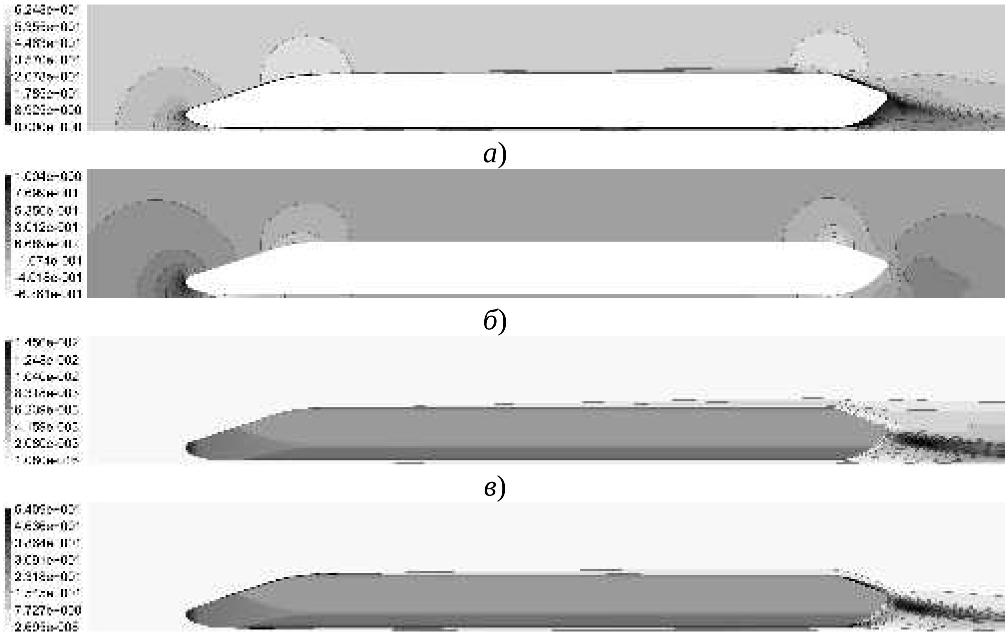


Рис. 1

**Результаты расчетов.** Ниже представлены результаты двух серий расчетов по определению влияния угла установки (первая серия расчетов) и расстояния до путевой структуры (вторая серия расчетов) на аэродинамические характеристики ВСНТ.

Результаты расчетов показали, что в области перед носовой частью корпуса ВСНТ образуется область повышенного давления, где поток затормаживается и скорость снижается. Затем, огибая расширяющуюся носовую часть сверху и с боков, поток ускоряется, образуя зоны пониженного давления. Скорость в потоке за боковыми кромками носовой части уменьшается примерно до скорости набегающего потока, при этом давление монотонно возрастает до значений в набегающем потоке.

Распределения модуля вектора скорости, коэффициента давления, вихревой вязкости и кинетической энергии турбулентности в продольном срединном сечении транспортного средства представлены соответственно на рис. 2, *а*, *б*, *в*, *г*, распределение модуля вектора скорости в горизонтальном сечении при y = 0,025 − на рис. 3, распределение вихревой вязкости и плотности в срединном поперечном сечении − на рис. 4.



*а*)

*б*)

*в*)

*г*)

Рис. 2

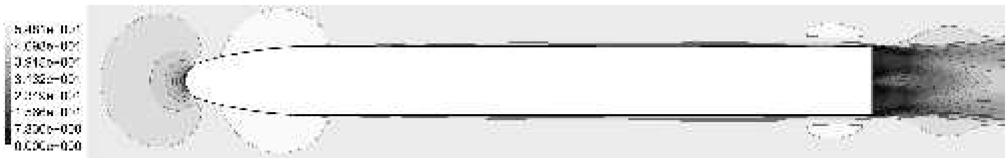
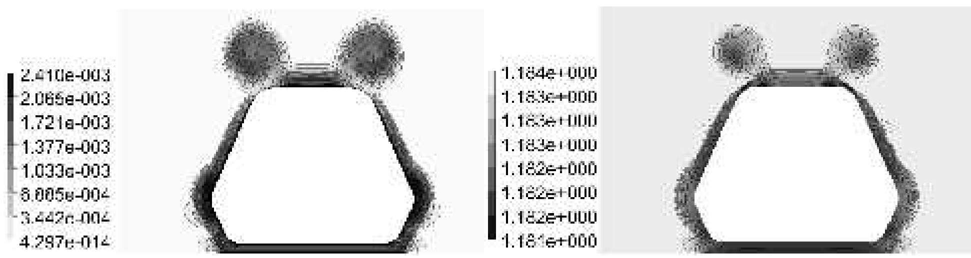


Рис. 3




*а*) *б*)

Рис. 4

Лишь малая часть набегающего потока входит в зазор между корпусом и экраном. Часть этого потока в первой четверти длины корпуса растекается в стороны, остальная часть продолжает прямолинейное движение к корме корпуса. Пограничный слой на центральной части корпуса постепенно утолщается. Вдоль нижних и, особенно, верхних кромок формируются продольные вихри, начинающиеся от носовой части корпуса и продолжающиеся к корме.

При обтекании задней кромки корпуса поток вновь ускоряется, образуя области пониженного давления.

За корпусом наблюдается отрыв потока возле горизонтального перегиба кормы, с образованием возвратного течения и формированием за нижней частью кормы двух крупномасштабных присоединенных вихрей. В потоке дальше за корпусом у экрана наблюдаются два продольных, противоположно вращающихся вихря. Оба вихря постепенно расходятся в стороны и увеличивают свой поперечный размер. Мгновенные линии тока между корпусом ВСНТ и экраном представлены на рис. 5, вокруг корпуса и в донной области − на рис. 6.

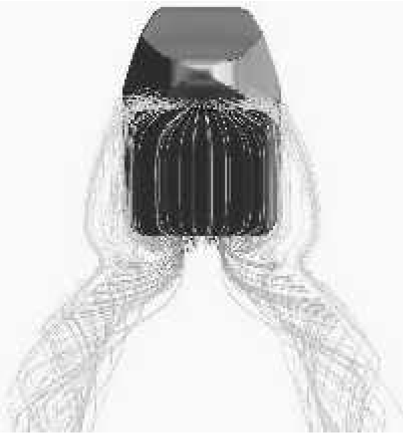


Рис. 5

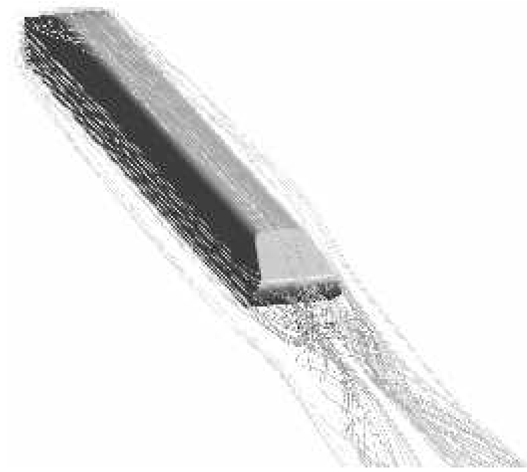


Рис. 6

Максимальное значение коэффициента давления достигается в носовой части корпуса ($C_p = 1$) (рис. 7), по мере удаления от носовой части коэффициент давления резко падает вплоть до отрицательных значений как на верхней, так и на нижней поверхностях корпуса. Ближе к середине тела коэффициент давления стремится к нулю, а затем падает ниже нуля и достигает минимума вблизи кормовой части, после чего возрастает до нуля в крайней кормовой точке. Минимальное же значение коэффициента давления $C_p$ = -0,8 достигается на нижней поверхности корпуса непосредственно за носовой частью.

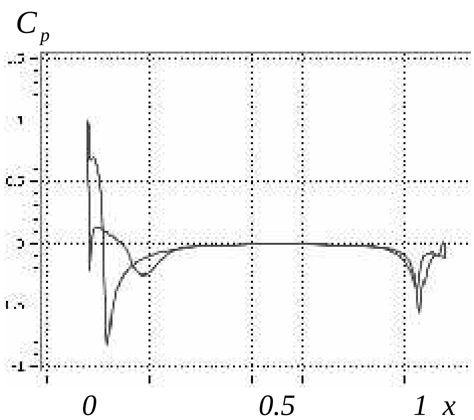



Рис. 7

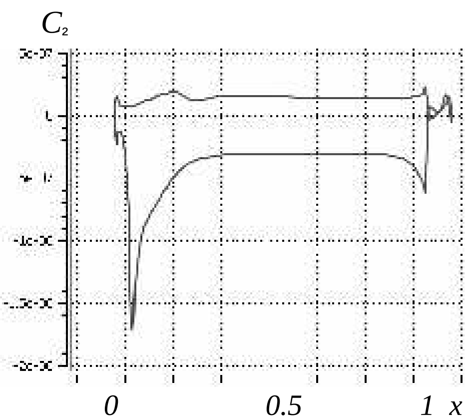



Рис. 8

Максимальное по модулю значение коэффициента трения $C_{\tau}$ наблюдается на нижней поверхности за носовой частью корпуса и имеет отрицательный знак (рис. 8). Далее практически по всей длине корпуса коэффициент трения имеет значение по модулю на порядок меньше, чем в носовой части, и лишь незначительно увеличивается к задней кромке корпуса. На кормовой части корпуса коэффициент трения близок к нулю. На верхней поверхности вдоль всего тела значение коэффициента трения в 2 − 3 раза меньше по модулю, чем на нижней поверхности, и имеет противоположный знак. Вблизи носовой части на верхней поверхности значительных изменений коэффициента трения не наблюдается, кроме смены знака при обходе контура с верхней на нижнюю поверхность.

На верхней поверхности, как и на нижней, значение коэффициента давления является отрицательным и относительно небольшим и колеблется в пределах от -0,012 до -0,155. Минимальное значение коэффициента давления наблюдается на верхних боковых ребрах корпуса, а максимальное – на крыше корпуса между серединой и боковыми ребрами. На нижней же грани и нижних боковых гранях коэффициент давления существенно не отличается и имеет среднее значение между максимальным и минимальным.

На экране в сечении $x$ = 0,5 максимальное по модулю значение коэффициента давления наблюдается в среднем сечении, над которым непосредственно находится корпус ВСНТ. При отходе в стороны от среднего сечения значение коэффициента давления по модулю уменьшается вплоть до нуля на боковых границах расчетной области.

Максимальное по модулю значение коэффициента давления в сечении $z$ = 0 на экране достигается вблизи носовой части корпуса ВСНТ (рис. 9). Максимальное положительное значение ($C_p$ = 0,7) достигается перед носовой частью корпуса, а максимальное по модулю отрицательное ($C_p$ = -0,8) – сразу за носовой частью, образуя резкий перепад. Далее на экране под корпусом ВСНТ наблюдается сравнительно небольшое, отрицательное значение коэффициента давления. Перед кормой достигается минимальное значение коэффициента давления и происходит неравномерный переход к положительному значению при выходе за корму, после чего значение коэффициента давления стремится к нулю. Распределение коэффициента трения в продольном сечении $z$ = 0 на экране приведено на рис.10.

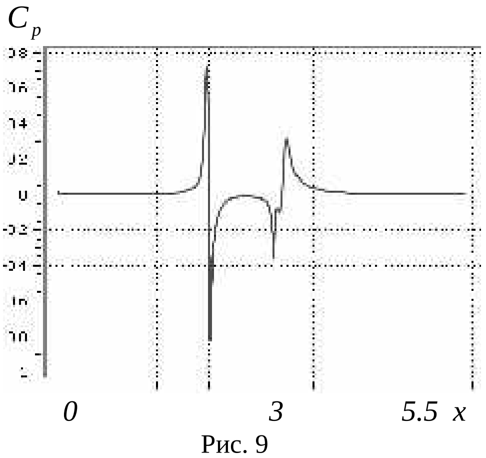


Рис. 9

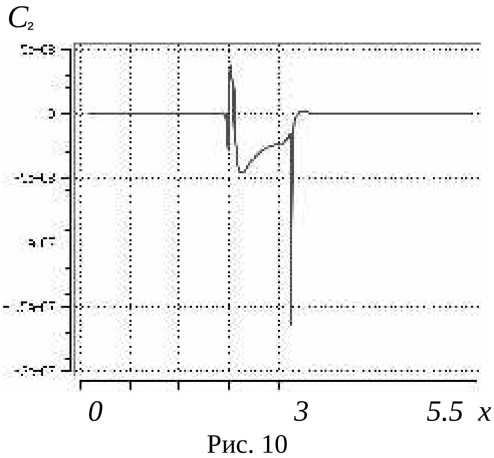


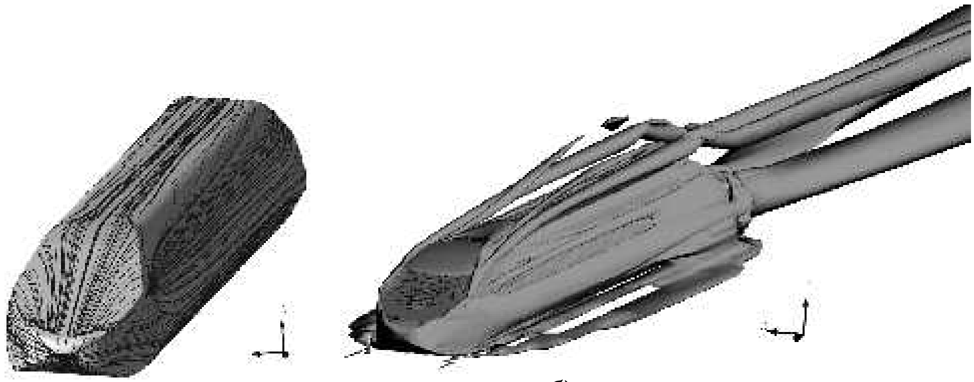
Рис. 10

На нижней части корпуса ВСНТ в зазоре над экраном формируется пограничный слой, здесь наблюдается скорость в 2,5 раза меньше, чем в набегающем потоке. Расчеты показали, что давление поперек зазора практически постоянное. Продольная скорость в зазоре вдоль корпуса уменьшается. В средней и хвостовой части тела ($x$ = 0,5; 0,8) по сравнению с носовой частью ($x$ = 0,2) скорость в зазоре уменьшается на 5 − 8 м/с (рис. 13).

По результатам расчетов получены следующие значения аэродинамических коэффициентов: $C_x = 0{,}312989$; $C_y = -0{,}112034$; $C_z = 2{,}54027 \times 10^{-5}$; $m_x = 0{,}003437$; $m_y = 1{,}7 \times 10^{-7}$; $m_z = -0{,}084545$.

Исследовано влияние угла установки ВСНТ в диапазоне от 0 до 2,5 градусов при расстоянии крайней задней точки днища до путевой структуры, равном $h$ = 0,013 $H$, где $H$ – высота корпуса ВСНТ. Расчеты выполнены при числе Рейнольдса, равном $\mathrm{Re} = 2 \times 10^8$.

Результаты визуализации мгновенных предельных линий тока на поверхности корпуса ВСНТ при угле установки α=0,05º приведены на рис. 11а, на поверхности постоянного значения инварианта скорости, равного 10 с$^{-2}$ − на рис. 11б.



*б)*

*а)*

Рис. 11

Для всех исследованных углов установки характерно безотрывное обтекание носовой части корпуса. За кормовой частью ВСНТ наблюдается система из двух присоединенных вихрей (рис. 5, 6, 11*б*), переходящих в два продольных противоположно вращающихся вихря в дальнем следе.

При малых углах установки затекающий под днище ВСНТ воздух ускоряется, а давление падает, что приводит к отрицательным значениям $C_y$ (рис. 12). Изменение угла атаки существенно влияет на развитие пограничного слоя на днище. При дальнейшем увеличении угла атаки набегающий поток оказывает все большее давление на днище, а ускорение при входе под днище становится все меньшим, вследствие чего коэффициент $C_y$ начинает расти. Существенное влияние на аэродинамические характеристики оказывает локальное ускорение воздуха под задней частью днища. Больше всего это влияние испытывает коэффициент $m_z$. Постоянное действие разрежения под кормой и рост давления набегающего потока на переднюю часть днища вследствие увеличения угла установки транспортного средства приводит к уменьшению коэффициента $m_z$. При малых углах установки (до $\alpha$ = 0,1°) коэффициент лобового сопротивления $C_x$ убывает. С увеличением угла установки после значения $\alpha$ = 0,1° коэффициент лобового сопротивления $C_x$ линейно возрастает во всем исследованном диапазоне углов установки со значения 0,302 до 0,318 .

Минимальное значение коэффициента $C_y$ наблюдается при угле установки $\alpha$ = 0,05°. После значения угла установки α = 0,05° наблюдается рост коэффициента $C_y$. При этом отрицательные значения коэффициента $C_y$ наблюдаются при углах установки от 0° до 0,7°, а при больших углах установки он становится положительным.

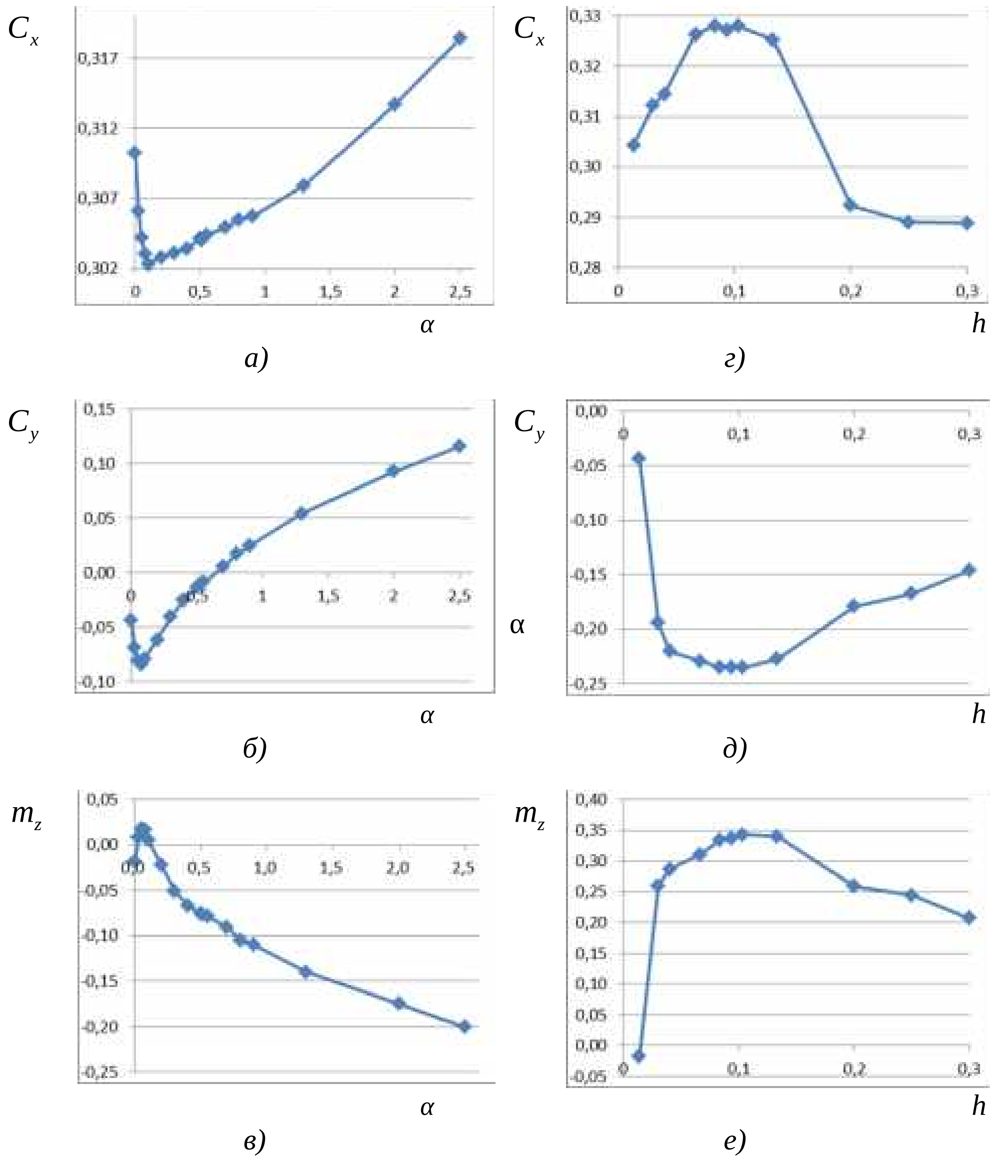



Рис. 12

Значения коэффициента момента $m_z$ во всем исследованном диапазоне углов установки были отрицательными, за исключением углов атаки, близких к нулю. Максимальное значение $m_z$ наблюдается при угле установки

$\alpha$ = 0,025º. С ростом углов установки после $\alpha$ = 0,025º значения коэффициента $m_z$ убывают.

Во второй серии вычислительных экспериментов исследовалось влияние расстояния до путевой структуры $h$ в пределах от 0,013 до 0,3 высоты ВСНТ на аэродинамические характеристики и структуру обтекания корпуса. На рис. 12 *г, д, е* представлены зависимости аэродинамических коэффициентов $C_x$, $C_y$, $m_z$ от расстояния до путевой структуры.

Коэффициент лобового сопротивления $C_x$ в диапазоне расстояний до путевой структуры от 0,013 до 0,067 линейно увеличивается, после чего до значения расстояния 0,13 не претерпевает существенных изменений. Далее, на промежутке до максимального расстояния до путевой структуры он уменьшается вплоть до значений меньше начальных и к расстояниям 0,25 − 0,3 выходит на практически постоянное значение.

Коэффициент подъемной силы $C_y$ во всем рассматриваемом диапазоне изменения расстояний до путевой структуры имеет отрицательные значения. Модуль $C_y$ на промежутке расстояний до путевой структуры от 0,013 до 0,04 резко уменьшается. Затем на промежутке расстояний до путевой структуры меньше 0,13 изменяет свое значение в небольших пределах: увеличивается при расстояниях до 0,1 и уменьшается при расстояниях до 0,13. Далее на оставшемся промежутке расстояний до путевой структуры до 0,3 он постепенно уменьшается с зависимостью, близкой к линейной.

Зависимость коэффициента $m_z$ от расстояния до путевой структуры подобна обратной зависимости коэффициента $C_y$. На начальном промежутке до 0,04 значение $m_z$ резко увеличивается, после чего он намного медленнее растет вплоть до значения расстояния 0,1, а после значения 0,15 медленно уменьшается на всем оставшемся промежутке расстояний до путевой структуры.

Разработанная методика и результаты расчетов могут быть применены при исследовании связанных задач динамики и аэродинамики, оптимизации аэродинамической формы, а также для выбора конструктивных параметров высокоскоростного транспортного средства на сверхпроводящих магнитах, системы подвеса и путевой структуры.

**Выводы.** Для расчета аэродинамических характеристик высокоскоростного транспортного средства применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье−Стокса. Установлено распределение газодинамических характеристик обтекания корпуса высокоскоростного транспортного средства над экраном.

В результате анализа мгновенных предельных и пространственных линий тока, а также завихренности и инварианта скорости в следе за высокоскоростным транспортным средством обнаружена система из двух поперечных и двух продольных, противоположно вращающихся вихрей.

Определено влияние угла установки и расстояния до путевой структуры на аэродинамические коэффициенты ВСНТ. В первой серии расчетов при малых углах установки на корпус ВСНТ действует отрицательная подъемная сила, которая прижимает корпус к путевой структуре. При углах установки

$\sim > 0{,}6^0$ на корпус действует положительная подъемная сила. В исследованном диапазоне углов установки наблюдается отрицательный момент $m_z$, за исключением углов атаки, близких к нулю. На всем исследованном диапазоне расстояний до путевой структуры во второй серии расчетов на корпус действует прижимающая сила и положительный момент $m_z$.


1. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / *В. А. Дзензерский, В. И. Омельяненко, С. В. Васильев, В. И. Матин, С. А. Сергеев.* – Киев : Наукова Думка, 2001. – 480 с.
2. Computational and wind tunnel experiment in high-speed ground vehicle aerodynamics / *O. A. Prykhodko, A. B. Sohatsky, O. B. Polevoy, A. V. Mendriy* // Proceedings of 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. – 2006. – N 118. – 10 pp.
3. *Minguez M. L.* High-order large-eddy simulation of flow over the “Ahmed body” car model / *M. L. Minguez, R. Pasquetti, E. Serre* // Physics of fluids. – 2008. – V. 20, 095101. – 17 pp.
4. *Приходько А. А.* Компьютерные технологии в аэрогидромеханике и тепломассообмене / *А. А. Приходько*. – Киев : Наукова думка, 2003. – 380 с.
5. *Menter F. R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / *F. R. Menter* // AIAA Journal. – 1994. – V. 32(8). – P. 1598 – 1605.



Днепропетровский национальный университет,
Институт транспортных систем и технологий НАН Украины,
Днепропетровск



Получено 10.11.14,
в окончательном варианте 09.12.14