УДК 532.516

Численное моделирование вихревых структур в донной области высокоскоростных транспортных средств на основе уравнений Навье-Стокса

М. С. Арсенюк, А. А. Приходько
Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Украина

Для расчета 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. Анализируются особенности обтекания носовой и кормовой частей корпуса, течения в зазоре между транспортным средством и путевой структурой. В потоке за телом наблюдаются система из двух поперечных и двух продольных, противоположно вращающихся вихрей.

Ключевые слова: *транспортное средство, аэродинамика, уравнения Навье-Стокса, метод контрольного объема, давление, коэффициент трения, вихревая структура.*

Для розрахунку 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. Аналізуються особливості обтікання носової та кормової частин корпусу, течії між транспортним засобом та шляховою структурою. У потоці за тілом спостерігаються система з двох поперечних і двох подовжніх вихорів, що обертаються в протилежних напрямах.

Ключові слова: *транспортний засіб, аеродинаміка, рівняння Нав’є-Стокса, метод контрольних об’ємів, тиск, коефіцієнт тертя, вихрова структура.*

For the flow calculation of high-speed vehicle near the track structure the three-dimensional Reynolds averaged Navier-Stokes equations are applied. For the turbulence simulation the SST model was used. The numerical solution of RANS was done by the finite volume method. The pressure distribution and the distribution of friction coefficient as well as limiting surface streamlines are introduced. The visualization of the 3D flow structure is presented. The features of the flow structure near the fore part and stern part of the body, and in the gap between vehicle and track structure are analyzed. In the flow behind the body the system of two transverse and two longitudinal, counter-rotating vortices is observed.

Key words: *vehicle, aerodynamics, RANS, finite volume method, pressure, friction coefficient, vortex structure.*

1. Введение

Создание новых перспективных транспортных средств – актуальная проблема, необходимость решения которой вызвана высокими скоростями, малыми расстояниями до экрана, ростом требований к техническим характеристикам транспортного средства.

Высокоскоростные транспортные средства (ВСНТ) на магнитном подвесе развивают большие скорости, порядка 500-600 км/ч. При таких скоростях существенное влияние на динамику движения транспортного средства оказывают аэродинамические силы, поэтому важно определить их еще на этапе проектирования [1-3].

Аэродинамические характеристики высокоскоростных транспортных средств тесно связаны со структурой обтекания, наличием отрыва потока и крупномасштабных вихрей в следе [1-3]. Следовательно, исследование физических механизмов, вовлеченных в формирование этих отрывов потока и их взаимодействий с вихревыми следами необходимо для успешного проектирования будущих транспортных средств.

В статье рассмотрена постановка задачи и результаты численного моделирования обтекания высокоскоростного транспортного средства на сверхпроводящих магнитах, движущегося над путевой структурой.

2. Постановка задачи

Для расчета обтекания высокоскоростного транспортного средства применяются трехмерные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса. При замыкании системы уравнений использовалась модель турбулентности SST [1-3]. В безразмерном виде уравнения Навье-Стокса имеют следующий вид:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial E}{\partial x}+\frac{\partial F}{\partial y}+\frac{\partial G}{\partial z}=\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial E_v}{\partial x}+\frac{\partial F_v}{\partial y}+\frac{\partial G_v}{\partial z}\right)+H\ . \tag{1}$$

Векторы Q, E, F, G, E_v, F_v, G_v, H определяются следующими соотношениями:

$$Q=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho w\\ e\\ \rho k\\ \rho\mu\end{bmatrix},\quad E=\begin{bmatrix}\rho u\\ \rho u^2+p_T\\ \rho uv\\ \rho wu\\ (e+p_T)u\\ \rho uk\\ \rho u\mu\end{bmatrix},\quad F=\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ \rho v^2+p_T\\ \rho wu\\ (e+p_T)v\\ \rho vk\\ \rho v\mu\end{bmatrix},\quad G=\begin{bmatrix}\rho w\\ \rho uw\\ \rho vw\\ \rho w^2+p_T\\ (e+p_T)w\\ \rho wk\\ \rho w\mu\end{bmatrix},\quad H=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ H_k\\ H_\mu\end{bmatrix},$$

$$E_v=\begin{bmatrix}0\\ \tau_{xx}\\ \tau_{xy}\\ \tau_{xz}\\ \tau_{xx}u+\tau_{yx}v+\tau_{zx}w+q_x\\ \sigma_k\frac{\partial k}{\partial x}\\ \sigma_\mu\frac{\partial\mu}{\partial x}\end{bmatrix},\quad F_v=\begin{bmatrix}0\\ \tau_{yx}\\ \tau_{yy}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{yx}u+\tau_{yy}v+\tau_{yz}w+q_y\\ \sigma_k\frac{\partial k}{\partial y}\\ \sigma_\mu\frac{\partial\mu}{\partial y}\end{bmatrix},\quad G_v=\begin{bmatrix}0\\ \tau_{zx}\\ \tau_{zy}\\ \tau_{zz}\\ \tau_{zx}u+\tau_{zy}v+\tau_{zz}w+q_z\\ \sigma_k\frac{\partial k}{\partial z}\\ \sigma_\mu\frac{\partial\mu}{\partial z}\end{bmatrix}.$$

Компоненты тензора напряжений и векторы тепловых потоков имеют вид

$$\tau_{xx}=\frac{2}{3}\mu_T\left(2\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{\partial w}{\partial z}\right),\ \tau_{yy}=\frac{2}{3}\mu_T\left(2\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{\partial w}{\partial z}\right),\ \tau_{zz}=\frac{2}{3}\mu_T\left(2\frac{\partial w}{\partial z}-\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{\partial v}{\partial y}\right),$$

$$\tau_{xy}=\tau_{yx}=\mu_T\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right),\ \tau_{xz}=\tau_{zx}=\mu_T\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right),\ \tau_{yz}=\tau_{zy}=\mu_T\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right),$$

$$q_x=\frac{k_T}{\Pr}\frac{\partial T}{\partial x},\quad q_y=\frac{k_T}{\Pr}\frac{\partial T}{\partial y},\quad q_z=\frac{k_T}{\Pr}\frac{\partial T}{\partial z},$$

где ρ – плотность, u, v, w – декартовы компоненты вектора скорости, T, e, k, ε – соответственно температура, полная удельная энергия, кинетическая энергия турбулентности, скорость диссипации энергии турбулентности; k_T и μ_T – суммарные коэффициенты теплопроводности и вязкости, учитывающие влияние молекулярного и турбулентного переноса; μ_k и μ_ε – коэффициенты переноса характеристик турбулентности; p_T – сумма гидростатического давления p и давления, обусловленного кинетической энергией турбулентности, $p_t=2\rho k/3$; H_k и H_ε – источниковые члены в уравнениях переноса характеристик турбулентности.

Давление рассчитывается из уравнения состояния

$$p=(\gamma-1)\left[e-\frac{1}{2}\rho\left(u^2+v^2+w^2\right)\right], \qquad (2)$$

где $\gamma=C_p/C_v$ – отношение удельных теплоемкостей.

На поверхности транспортного средства и экране задавались условия прилипания. На бесконечности задавались параметры невозмущенного потока.

Численное решение системы исходных уравнений получено методом контрольных объемов.

Расчеты выполнены на гексаэдральной многоблочной сетке, состоящей из 1’220’000 узлов. Минимальный шаг сетки 0.0035мм. Средняя толщина вязкого подслоя по корпусу составляла y^+=0.88.

3. Результаты расчетов

В результате расчетов определены распределения газодинамических характеристик при обтекании корпуса ВСНТ над экраном, аэродинамические коэффициенты транспортного средства, а также распределение коэффициентов трения и давления по поверхности экрана.

Рис. 1. Распределение модуля скорости в продольном срединном сечении транспортного средства

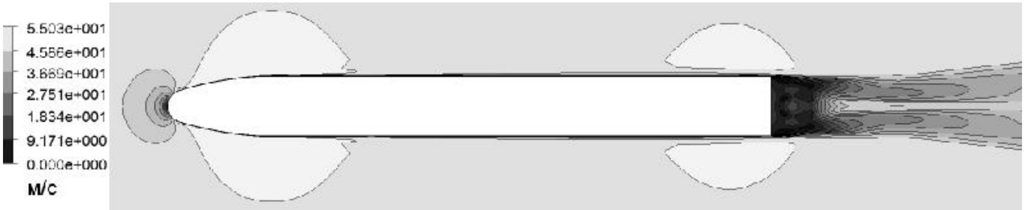


Рис. 2. Распределение модуля скорости в горизонтальном сечении транспортного средства при y = 0.3

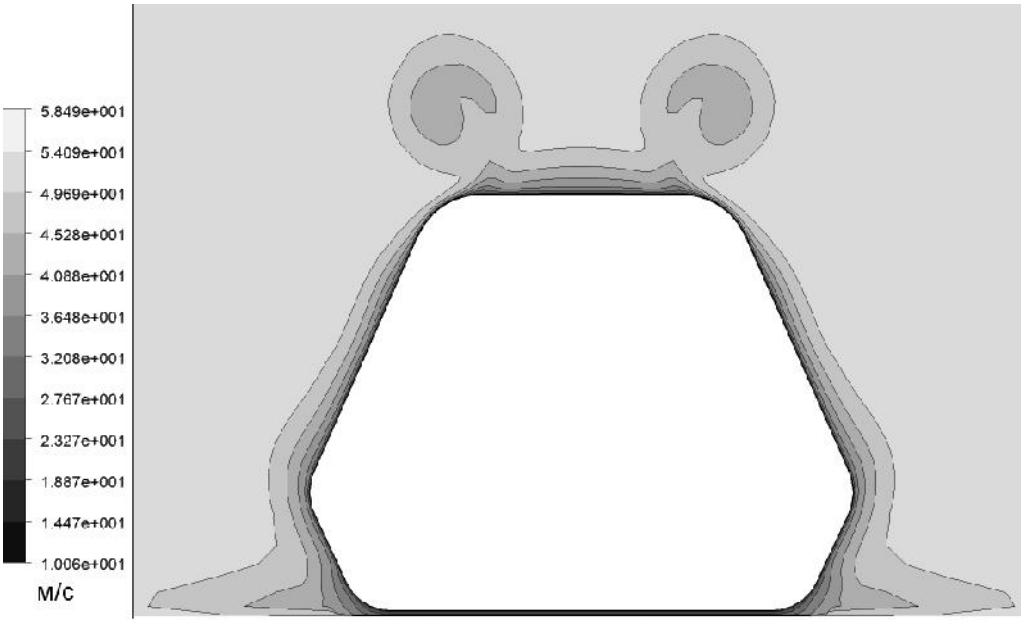


Рис. 3. Распределение модуля скорости в срединном поперечном сечении транспортного средства

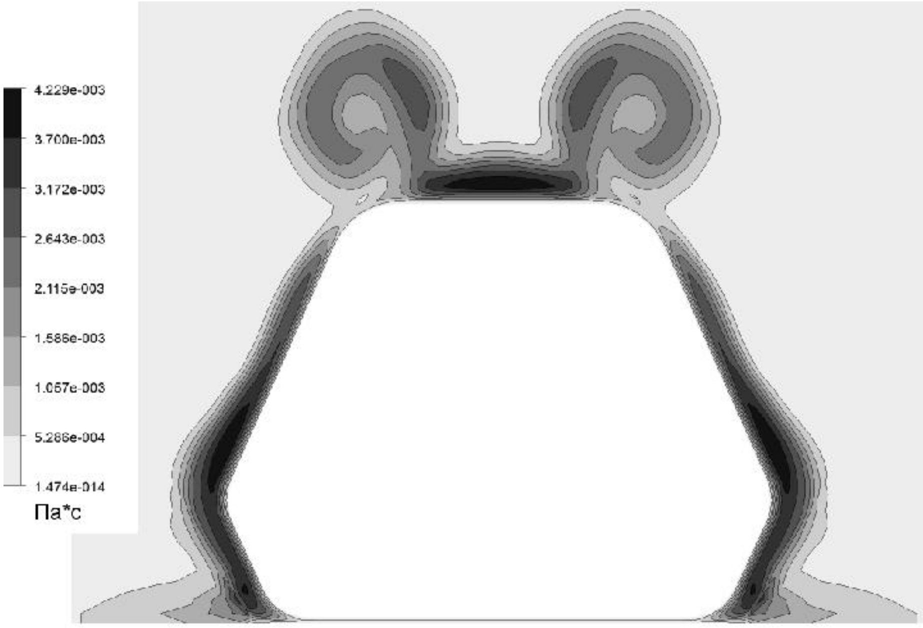


Рис. 4. Распределение турбулентной вязкости в срединном поперечном сечении транспортного средства

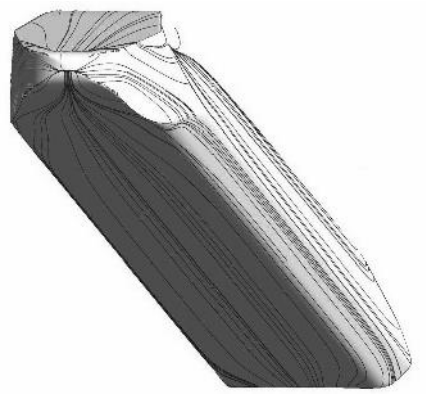


Рис. 5. Предельные линии тока на корпусе ВСНТ

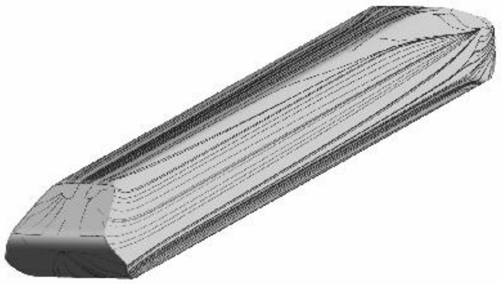


Рис. 6. Предельные линии тока на корпусе ВСНТ

.

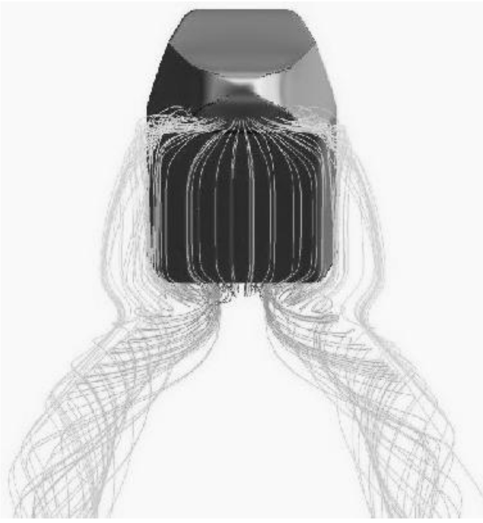


Рис. 7. Линии тока между корпусом ВСНТ и экраном

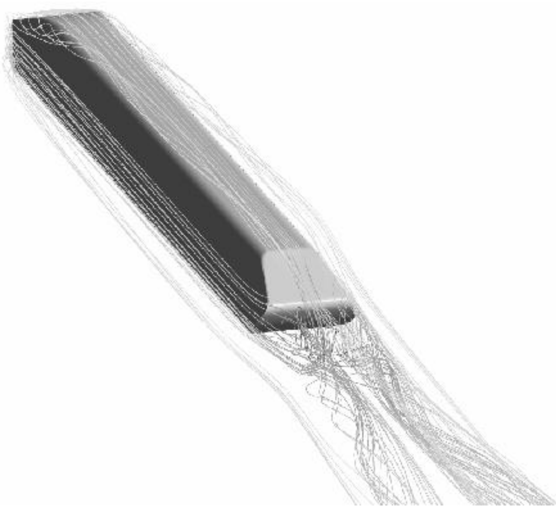


Рис. 8. Линии тока вокруг корпуса ВСНТ

Результаты расчетов показали, что в области перед носиком 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. Обогнув задние кромки носовой части корпуса, скорость уменьшается примерно до скорости набегающего потока, при этом давление повышается.

Лишь малая часть набегающего потока входит в зазор между корпусом и экраном. Часть этого потока в первой четверти длинны 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 носа 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.

Максимальное значение коэффициента давления достигается в носовой части корпуса (C_p=1) (рис. 9), по мере удаления от носика 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.

Максимальное по модулю значение коэффициента трения C_z наблюдается на нижней поверхности за носиком тела и имеет отрицательный знак (рис. 10). 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 носика на верхней поверхности значительных изменений коэффициента трения не наблюдается, кроме как смена знака при обходе контура с верхней на нижнюю поверхность.

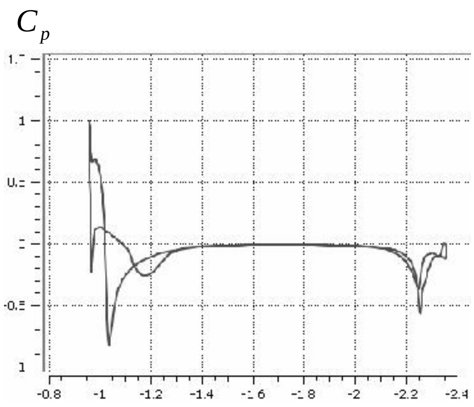


Рис. 9. Распределение коэффициента давления C_p по контуру продольного срединного сечения ВСНТ

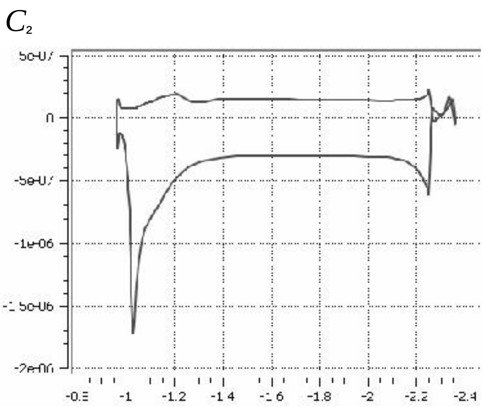


Рис. 10. Распределение коэффициента трения C_z по контуру продольного срединного сечения ВСНТ

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. Отходя 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*=0.5 на экране достигается вблизи носовой части корпуса ВСНТ (рис. 11). Максимальное положительное значение (C_p =0.7) достигается перед носиком корпуса, а максимальное отрицательное (C_p =-0.8) – сразу за носиком, образуя резкий перепад. Далее на экране под корпусом ВСНТ наблюдается сравнительно небольшое, отрицательное значение коэффициента давления. Перед кормой достигается пик минимального значения коэффициента давления и происходит неравномерный переход к положительному значению при выходе за корму, после чего значение коэффициента давления стремится к нулю.

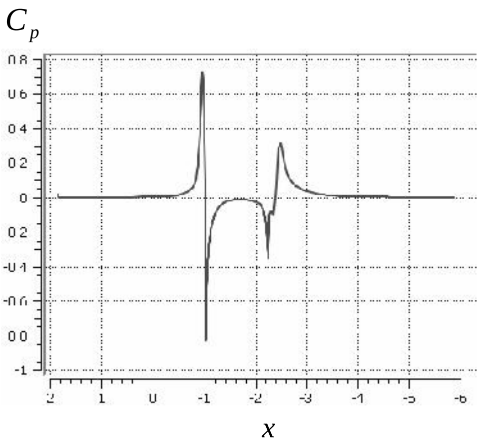


Рис. 11. Зависимость коэффициента давления C_p от координаты x на экране при z=0.5

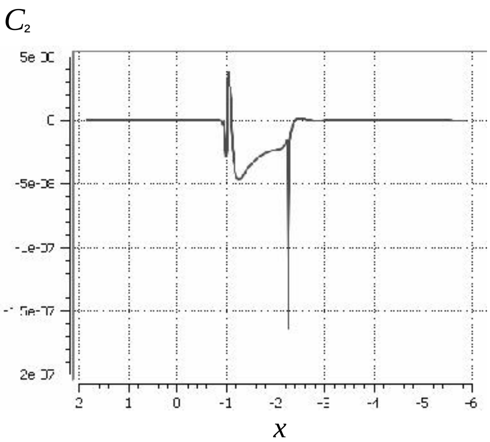
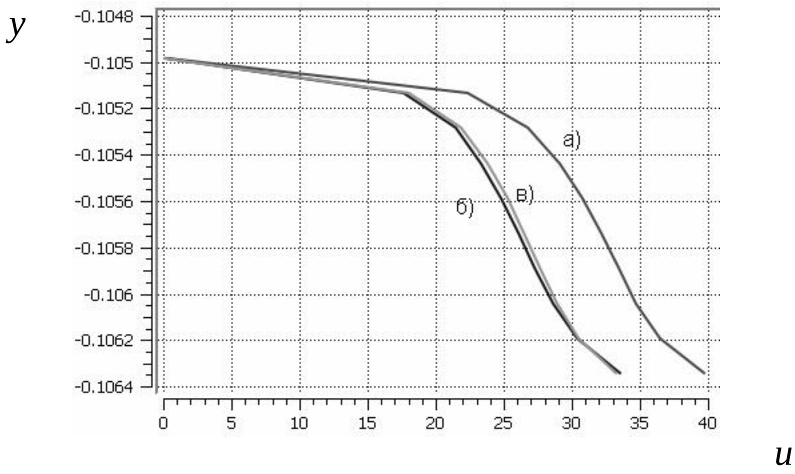


Рис. 12. Зависимость коэффициента трения C_z от координаты x на экране при z=0.5

На нижней части корпуса ВСНТ в зазоре над экраном формируется пограничный слой, здесь наблюдаются 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 задней части тела (*x*=0.5, 0.8) по сравнению с передней частью (*x*=0.2) скорость в зазоре уменьшается на 5-8 м/с (рис. 13).



а) x=0.2; б) x=0.5; в) x=0.8;

Рис. 13. Эпюры скорости в зазоре между телом ВСНТ (сверху) и экраном (снизу) при z=0.5

По результатам расчетов получены следующие значения аэродинамических коэффициентов:

$$C_x = 0.312989 \;;\quad C_y = \text{-}0.112034;\quad C_z = 2.54027\times10^{-5};$$

$$m_x = 0.00343778\;;\quad m_y = 1.7\times10^{-7};\quad m_z = \text{-}0.084545.$$

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

4. Выводы

1. Для расчета аэродинамических характеристик высокоскоростного транспортного средства применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса.
2. Установлено распределение газодинамических характеристик обтекания корпуса высокоскоростного транспортного средства над экраном. Определены аэродинамические коэффициенты транспортного средства.
3. В результате анализа предельных линий тока и завихренности в следе за высокоскоростным транспортным средством обнаружена система из двух поперечных и двух продольных, противоположно вращающихся вихрей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Prykhodko O.A., Sohatsky A.B., Polevoy O.B., Mendriy A.V. Computational and wind tunnel experiment in high-speed ground vehicle aerodynamics // Proceedings of 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. N 118. – 10 pp.
2. Minguez M.1, Pasquetti R., Serre E. High-order large-eddy simulation of flow over the “Ahmed body” car model // Physics of fluids, 2008. v. 20, 095101. – 17 pp.
3. Приходько А. А. Компьютерные технологии в аэрогидромеханике и тепломасообмене. – Киев: Наукова думка, 2003. – 380 с.
4. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA-Journal., 32(8), 1994. – P. 1598 – 1605.
5. Grotjans, H. and Menter, F.R. Wall functions for general application CFD codes” // In K.D.Papailiou et al., editor, ECCOMAS 98 Proceedings of the Fourth European Computational Fluid Dynamics Conference, John Wiley & Sons, 1998. – P. 1112-1117.
6. Wilcox, D.C. Multiscale model for turbulent flows // AIAA 24th Aerospace Sciences Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986. – 15 p.

Надійшла у першій редакції 16.03.2012, в останній – 20.03.2012.