

Приходько А.А.,

Днепровский национальный университет им. О. Гончара, Украина

Арсенюк М.С.

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ГЕОМЕТРИЕЙ КОРПУСА ТИПА AHMED CAR

Транспорт является одной из основ современного мира - подавляющая часть перевозок груза и пассажиров внутри стран осуществляется автомобилями и поездами. Прогресс человеческого общества требует постоянного увеличения скоростей перевозок, их экономичности, безопасности и бесшумности. Добиться этого можно улучшая силовую установку, систему подвеса, аэродинамику корпусов, внутреннее пассажирское снаряжение.

Современная автомобильная промышленность все чаще обращается к помощи численного расчета аэродинамических характеристик транспортных средств для оптимизации их формы, повышения устойчивости и экономичности. Численные методы моделирования аэродинамики на основе решения уравнений Навье-Стокса позволяют при сравнительно небольших временных затратах получить удовлетворительные результаты без использования дорогостоящих натуральных экспериментов на полномасштабных моделях транспортных средств.

Многообразие конструктивных элементов автомобилей и широкий диапазон эксплуатационных ситуаций приводит к появлению вихревых структур в следе при обтекании корпуса, которые оказывают существенное влияние на аэродинамические характеристики. В настоящее время созданы предпосылки для широкого применения методов вычислительной аэродинамики для определения особенностей обтекания корпусов наземного транспорта, выбора компоновки, геометрии транспортного аппарата на этапе проектирования [1–3].

При проведении численного моделирования аэродинамики одной из главных задач перед самим расчетом целевой геометрии является тестирование разработанной методики. Тестирование можно проводить на нескольких задачах – от более простых (обтекание цилиндра) до более сложных, приближенных к целевым – например, обтекание упрощенной модели автомобиля, предложенной Ahmed S.R. [4] (упоминается в литературе как «Ahmed reference car model» или «Ahmed car»), по которой на сегодня имеется большое множество данных, как по натурным экспериментам, так и по результатам численного моделирования с разнообразными подходами [4–6]. Данный факт позволяет сравнивать разнообразные подходы численного моделирования, методики, модели турбулентности и проводить верификацию, используя экспериментальные данные.

Целью данной работы является тестирование разработанной методики численного моделирования на основе уравнений Навье-Стокса, на задаче обтекания упрощенной модели автомобиля типа Ahmed Car.

В настоящей работе рассматриваются результаты численного моделирования обтекания модели транспортного средства с геометрией типа Ahmed Car [4] вблизи путевой структуры набегающим потоком со скоростью $V = 40$ м/с (рис. 1).

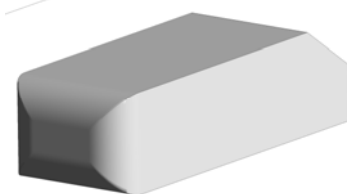


Рис. 1. Общий вид Ahmed Car

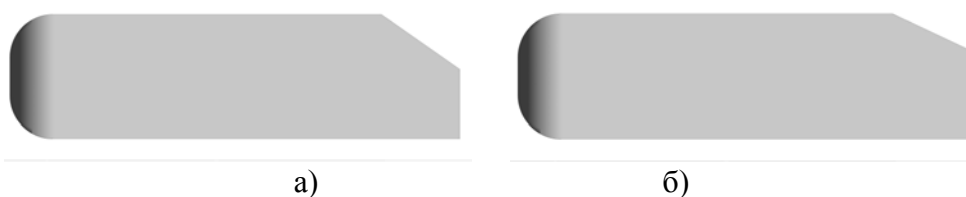


Рис. 2. Вид сбоку на Ahmed Car с углом скоса 35° (а) и 25° (б)

Корпус модели типа Ahmed Car состоит из параллелепипеда 1,05 м длинной, 0,28 м высотой и 0,39 м шириной, с цилиндрическими скруглениями передних ребер и косым срезом заднего верхнего ребра. В расчете участвовали две геометрии с двумя углами заднего скоса – 25 и 35° . Модель расположена вблизи плоскости, имитирующей путевую структуру на расстоянии 0,05 м (рис. 1).

Для исследования обтекания модели типа Ahmed Car потоком вязкой несжимаемой жидкости воспользуемся уравнением неразрывности и осредненными по Рейнольдсу нестационарными трехмерными уравнениями Навье-Стокса:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0,$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right).$$

Здесь x_i – декартовы координаты, u_i – декартовы компоненты вектора скорости, $i, j = 1, 2, 3$, предполагается суммирование по одинаковым индексам, t – время, p – давление, ρ – плотность, $\overline{u_i u_j}$ – напряжения Рейнольдса. При замыкании системы уравнений использовалась модель турбулентности SST (Shear Stress Transport).

В качестве начальных условий приняты параметры невозмущенного потока. Граничные условия: на бесконечности задавались параметры невозмущенного потока, на корпусе модели и на путевой структуре – условия прилипания. При интегрировании уравнений применяется метод конечного объема. В

расчетах использовались численные методики, имеющие второй порядок аппроксимации по времени и пространственным переменным [1, 4]. Расчеты выполнены на гексаэдрической неструктурированной сетке, состоящей из 3.5 млн узлов.

В результате численного эксперимента получены распределения параметров газа в области вокруг модели Ahmed Car, а так же воздействие, оказываемое набегающим потоком на корпус модели. На рис. 3–9 представлена визуализация течения вокруг корпуса модели Ahmed Car.

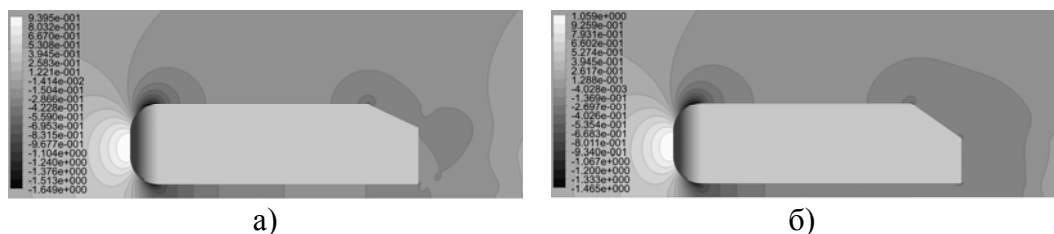


Рис. 3. Распределение давления в плоскости симметрии Ahmed Car с углом скоса 25° (а) и 35° (б)

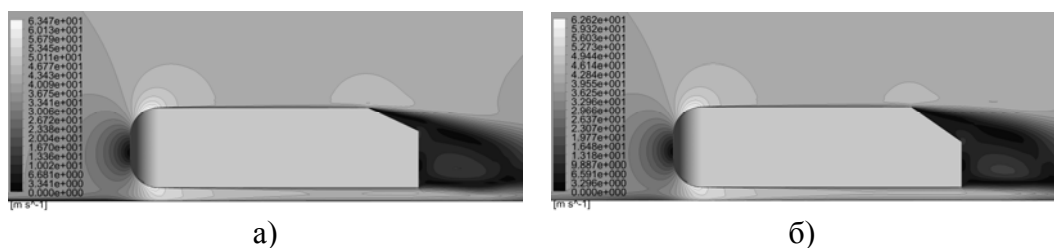


Рис. 4. Распределение модуля вектора скорости в плоскости симметрии Ahmed Car с углом скоса 25° (а) и 35° (б)

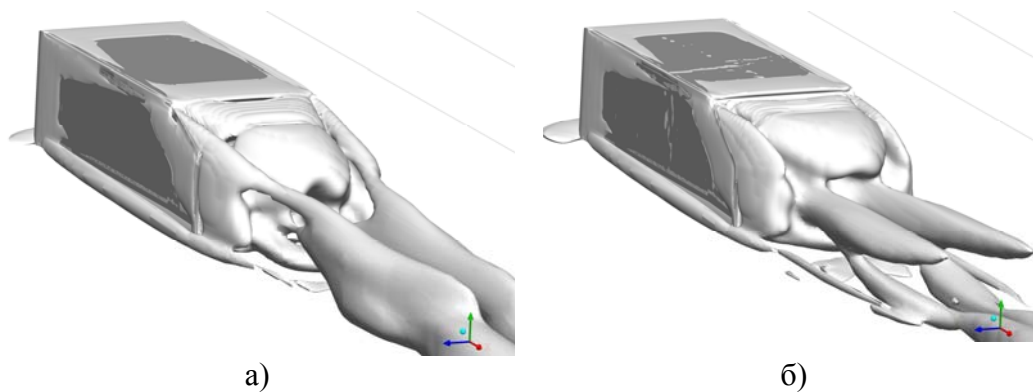


Рис. 5. Поверхность постоянного значения инварианта скорости Q вокруг Ahmed Car с углом скоса 25° (а) и 35° (б)

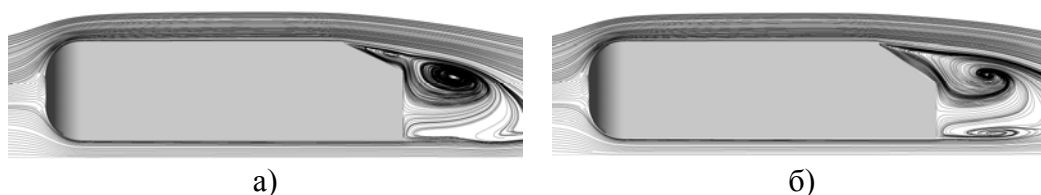


Рис. 6. Линии тока в плоскости симметрии Ahmed Car с углом скоса 25° (а) и 35° (б)

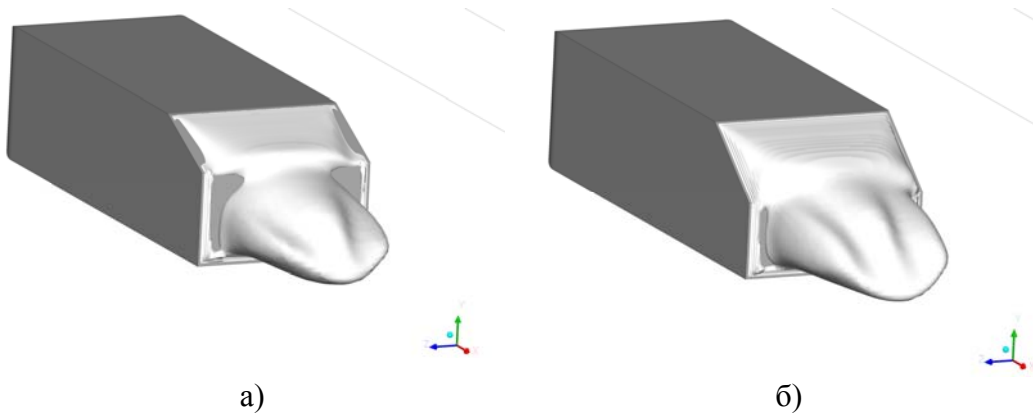


Рис. 7. Область возвратного течения за корпусом Ahmed Car с углом скоса 25° (а) и 35° (б)

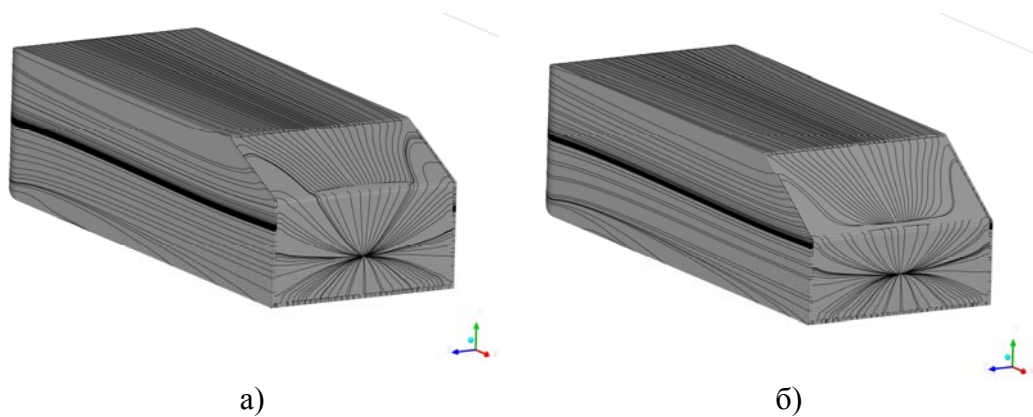


Рис. 8. Поверхностные линии тока (б) на корпусе Ahmed Car с углом скоса 25° (а) и 35° (б)

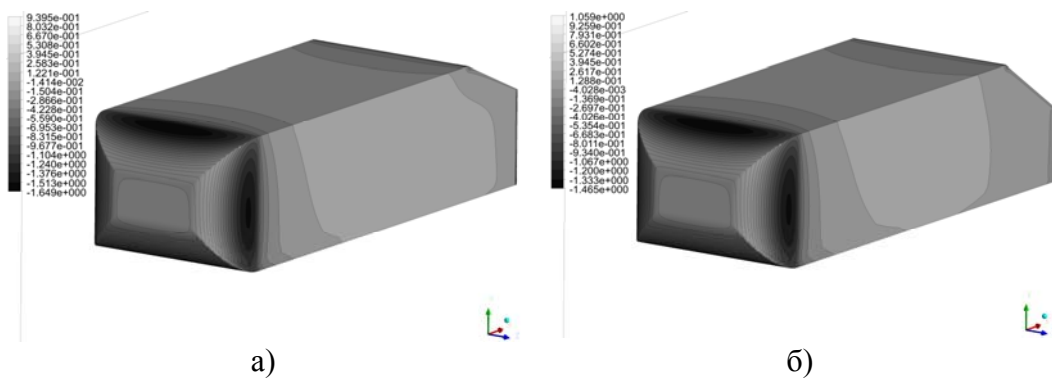


Рис. 9. Распределение коэффициента давления C_p по поверхности корпуса Ahmed Car с углом скоса 25° (а) и 35° (б)

На рис. 3, рис. 4, рис. 9 представлены распределения коэффициента давления и модуля вектора скорости в продольном срединном сечении и на корпусе модели Ahmed Car. Пространственная структура течения, поверхностные линии тока и область возвратного течения представлены на рис. 5–8. Распределение коэффициента давления и трения вдоль центральной линии среза на корпусе Ahmed Car представлены на рис. 10 и 11.

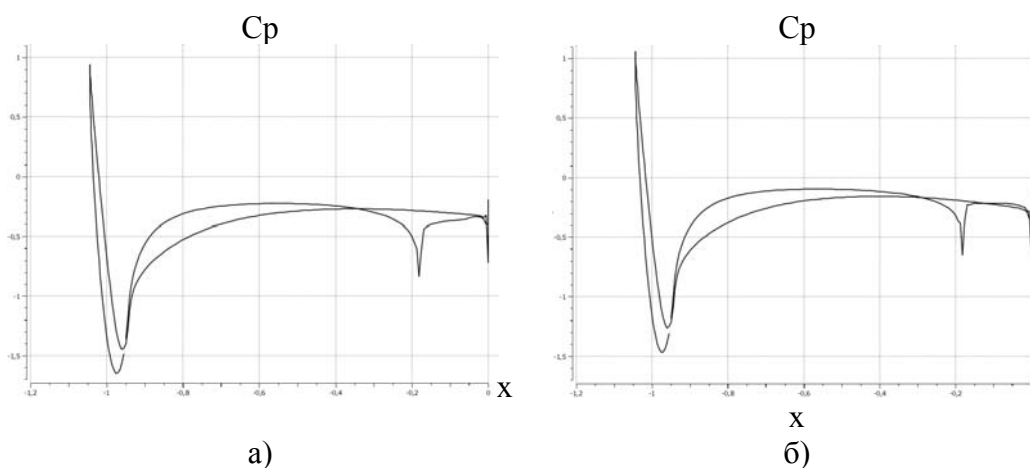


Рис. 10. Распределение коэффициента давления C_p вдоль линии среза по центру корпуса Ahmed Car с углом скоса 25° (а) и 35° (б)

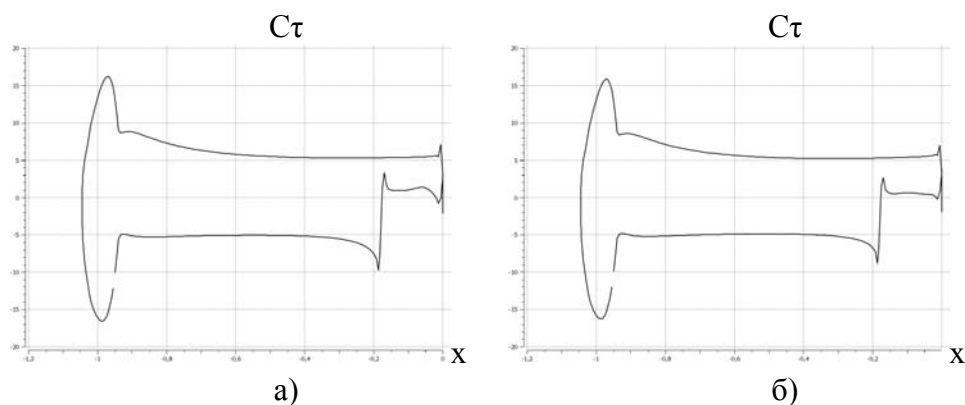


Рис. 11. Распределение коэффициента трения C_t вдоль линии среза по центру корпуса Ahmed Car с углом скоса 25° (а) и 35° (б)

Распределения давления, трения и скорости (рис. 5 – рис. 6) показывают типичную картину обтекания тела плохообтекаемой формы – перед носовой частью образуется область торможения воздуха и повышения давления, за передними кромками по всему периметру образуются зоны пониженного давления и ускорения потока воздуха.

Визуализация пространственного течения и поверхностных линий тока показывают наличие отрыва потока с задних кромок корпуса Ahmed Car с формированием системы присоединенных крупных поперечных вихрей и нескольких противоположно вращающихся продольных вихрей, сходящих с задних боковых кромок корпуса и образующих вихревой след за корпусом модели. Один большой поперечный вихрь располагается сразу за всей задней поверхностью корпуса модели, однако при угле скоса 25° он разбивается на два поперечных вихря задней кромкой. Вокруг большого поперечного вихря имеется система из противоположно-вращающихся продольных вихрей. Два крупных противоположно-вращающихся продольных вихря отходят от корпуса

и образуют вихревой след за телом. Два продольных вихря меньшего масштаба сходят с нижних боковых кромок носовой части и располагаются вдоль всего тела до зоны задних вихрей.

Выводы

На основе нестационарных трехмерных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса выполнено численное моделирование обтекания модели Ahmed Car потоком вязкого сжимаемого газа.

Представлены результаты визуализации пространственной вихревой структуры при обтекании корпуса модели, распределения давления и трения на ее поверхности. Анализ результатов показал наличие отрыва за задней поверхностью корпуса модели и систему поперечных и продольных вихрей. Два самых крупных продольных поперечно вращающихся вихря формируют вихревой след за корпусом модели Ahmed Car.

Литература

1. Приходько А.А. Компьютерные технологии в аэрогидромеханике и тепло-массообмене. – Киев: Наукова думка, 2003.-380 с.
2. Приходько А.А., Арсенюк М.С., Алхимов А.В. Математическое моделирование вихревых структур при пространственном обтекании цилиндра // Труды XVII Международного симпозиума «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики» (МДОЗМФ- 2015). Харьков-Сумы, 2015. – С. 216-219.
3. Приходько А.А. Программное-методическое обеспечение для расчета на основе уравнений Навье-Стокса обтекания летательных аппаратов и их элементов // Авиа-2017. Доклады XIII Международной научно-технической конференции, Киев, 19-21 апреля. Секция «Аэродинамика и безопасность полетов».2017. - С. 22.6-22.10.
4. Ahmed, S.R., Ramm, G., Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. SAE Technical Paper 840300, 1984.
5. Minguez M., Pasquetti R., Serre E. High-order large-eddy simulation of flow over the «Ahmed body» car model // Physics of Fluids, 2008. 20, N095101, 2008. – 17 p. doi: 10.1063/1.2952595.
6. Gilliéron P., Chometon F., Modelling of Stationary Three-Dimensional Separated Air Flows around an Ahmed Reference Model, ESAIM: Proc. 7, 1999. - P.173-182.