

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ CHEVROLET

Акромов А.А.¹, Абдуразаков А.М.²



¹Акромов Ахрор Адхамжон угли – ассистент;
²Абдуразаков Ахмадулло Мухаммадович – ассистент,
кафедра строительства инженерных коммуникаций, строительный факультет,
Ферганский политехнический институт
г. Фергана, Республика Узбекистан

Аннотация: работа посвящена численному исследованию обтекания автомобилей Chevrolet (Malibu-2, Captiva, Cruze) с помощью разработанного авторами программного комплекса для расчета двумерных турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости. Для моделей турбулентности Спаларта–Аллмараса и $k-\varepsilon$ проведен сравнительный анализ влияния выбора модели на характер течения.

Ключевые слова: уравнения RANS, модель турбулентности Спаларта–Аллмараса, модель турбулентности $k-\varepsilon$.

УДК: 696.11

Введение

Движение автомобиля сопровождается многочисленными процессами взаимодействия с окружающим его воздухом. Эти процессы можно объединить в три группы:

- обтекание внешней поверхности автомобиля;
- потоки внутри кузова;
- потоки внутри агрегатов.

Обтекание внешним потоком воздуха приводит к возникновению сил и моментов, действующих на автомобиль, которые весьма существенно влияют на потребляемую мощность и курсовую устойчивость.

Сопrotивление воздуха, а также другие компоненты результирующей аэродинамической силы и их моменты возрастают в квадратичной зависимости от скорости движения автомобиля.

Увеличение плотности движения почти всегда приводят к образованию колонн автомобилей, чаще состоящих из грузовых автомобилей. Вследствие отсутствия условий для обгона и существования ограничения максимальных скоростей движения такие колонны распадаются очень медленно. В то же время очень часто имеет место довольно высокая средняя скорость движения в колоннах, по крайней мере, на трассе. В этом случае наблюдается интерференция между полями потоков, обтекающих автомобили. Каждый автомобиль оставляет позади себя характерный вихревой след. Он уменьшает давление скоростного напора, действующее на следующий за ним автомобиль. Этот эффект, известный на автотранспорте под названием «движение в попутной струе» для грузовых автомобилей выражен особенно сильно, поэтому, по мере удаления от начала колонны наблюдается явное снижение значений коэффициента аэродинамического сопротивления автомобилей.

Если колонна состоит из нескольких автомобилей, и водители при скорости движения 80 км/ч соблюдают безопасную дистанцию, равную половине показаниям спидометра 40 м, то сила сопротивления воздуха, действующая на второй автомобиль, будет на 20 % ниже, чем на первый, а для третьего и каждого последующего она будет меньше примерно на 30 %. При этом вовсе не обязательно следовать точно по колее предыдущего автомобиля, можно сместиться вбок на величину до половины ширины автомобиля. Поскольку с уменьшением дистанций между автомобилями снижение значений коэффициентов аэродинамического сопротивления становится еще больше, то следует категорически предостеречь от возможной эйфории по поводу экономии топлива, так как существенное уменьшение расхода топлива может быть приобретено ценой опасного для участников движения уменьшения дистанции между автомобилями. Настоящая работа посвящена исследованию возможности применения широко используемых в настоящее время моделей турбулентности Спаларта–Аллмараса (SA) и $k-\varepsilon$ для моделирования задач данного класса. В этих целях проведены сравнительный анализ обтекания внешней поверхности автомобилей.

Постановка задачи

Рассматриваемая характеристика модели автомобилей (таб.1) За единицу длины взят продольный размер тела. Скорость набегающего потока $V=100$ км/час, угол атаки $\alpha=0$.

Таблица 1. Характеристика модели автомобилей

Название	Высота, мм	Длина, мм	Ширина, мм
Malibu-2	1466	4923	1854

Captiva	1720	4637	1849
Cruze	1477	4597	1788

Уравнения RANS

В качестве математической модели будем использовать систему нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), в декартовой системе координат принимающую вид:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = -\frac{dp}{dx_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' v_j'} \right), \quad (1)$$

В уравнений (1) $\overline{\rho u_i' v_j'}$ -тензор Рейнольдсового напряжения, $\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$, -уравнение неразрывности.

Начальные и граничные условия для системы уравнений (1) ставятся стандартным образом [1].

Гипотеза Буссинеска

Буссинеск (1877г.) предложил ввести дополнительную турбулентную вязкость. Большинство моделей используют обобщенную гипотезу Буссинеска (2)

$$-\overline{u_i' v_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{i,j} \quad (2)$$

Где линейный связь между тензором Рейнольдсового напряжения и тензором скоростей деформаций. Аналог реологический закона Ньютона для молекулярной вязкости.

Стандартная модель турбулентности k-ε

В пакете COMSOL Multiphysics 5.3a уравнения стандартной k-ε модели применяются в несколько ином, модернизированном виде. Его можно получить путем алгебраических преобразований, и он также описывается создателями модели [2].

$$\begin{aligned} u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_s}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \varepsilon, \\ u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_s}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (3)$$

В данной системе уравнений $\nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$ представляет турбулентную кинетическую энергию, образованную от средних градиентов скорости.

Где $\nu_t = C_v \frac{k^2}{\varepsilon}$; Остальные константы определены из экспериментов для фундаментальных турбулентных жидкостей и имеют следующие значения:

$$C_v = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

Модель турбулентности Спаларта–Аллараса

В работе используется вариант однопараметрической модели турбулентности Спаларта–Аллараса (SA) для несжимаемых течений [3] с модификацией Эдвардса [4]. В рамках этой модели осредненная величина кинетической энергии турбулентных пульсаций не может быть найдена напрямую, в силу чего полагается $k=0$.

Турбулентная вязкость задается соотношением

$$\nu_t = \bar{v} f_{v1}, f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}, \chi = \frac{\bar{v}}{\nu}$$

где \bar{v} – модельная величина, которая определяется из основного уравнения модели

$$\frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v} u) = \rho(P_v - D_v + T_v) + \frac{1}{\sigma_v} \nabla[(\mu + \mu_t) \nabla \bar{v}] + \frac{C_{b2}}{\sigma_v} \rho (\nabla \bar{v})^2 - \frac{1}{\sigma_v \rho} (\mu + \rho \bar{v}) \nabla \rho \nabla \bar{v}. \quad (4)$$

Величины P_v и D_v , отвечающие соответственно за производство и диссипацию турбулентности, и T_v – за определение ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое записываются в виде

$$P_v = C_{b1} (1 - f_{t2}) \bar{S}_v, D_v = (C_{w1} f_w - \frac{C_{b1}}{k_r^2} f_{t2}) \left[\frac{\bar{v}}{s} \right]^2, T_v = f_{t1} (\Delta U)^2,$$

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right], g = r + C_{w2} (r^6 - r).$$

Здесь ΔU – модуль разности между скоростями в потоке и ближайшей точке ламинарно-турбулентного перехода, d – расстояние от твердой стенки. Остальные величины являются константами модели и представлены в таб. 2.

Таблица 2. Константы модели SA

σ_v	k_r	C_{b1}	C_{b2}	C_{v1}	C_{w1}	C_{w2}	C_{w3}
2/3	0.41	0.1335	0.622	7.1	$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{1+C_{b2}}{\sigma}$	0.3	2.0

Результаты расчетов

Численные расчеты проводились с помощью разработанного COMSOL Multiphysics 5.3a программного комплекса, предназначенного для моделирования двухмерных турбулентных течений вязкого несжимаемого газа на высокопроизводительных вычислительных системах. В комплексе реализованы алгоритмы для описанной выше математической модели на основе уравнений RANS, для замыкания которых используются модели турбулентности *Спаларта–Аллмараса* и *k-ε*.

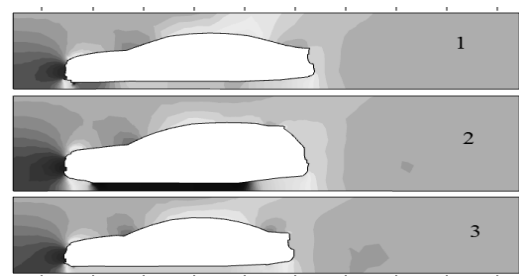


Рис. 1. Поле давления на поверхности тела. Расчет с моделью SA (1-Malibu-2, 2-Captiva,3-Cruze)

На рис. 1 представлено распределения поля давления на поверхности тела.

Рост давления на стороне перед корпусом соответствует области отрыва. Поле давления и линии тока около «корпуса» показаны на рис. 2А. Двигаясь, автомобиль сжимает находящиеся перед ним воздушные массы, создавая область повышенного давления. Потoki воздуха обтекают кузов, а там, где он заканчивается, происходит отрыв воздушного потока, создаются завихрения и область пониженного давления. Таким образом, область высокого давления спереди мешает автомобилю двигаться вперед, а область пониженного давления сзади «засасывает» его назад. Сила завихрений и величина области пониженного давления определяется формой задней части кузова. Более подробно пространственные структуры вихрей можно увидеть на рис. 2Б, а поле скоростей можно увидеть на рис. 3. В расчетах по модели *k-ε* наблюдается несколько большая (вытянутая вверх по течению) рециркуляционная зона на подветренной стороне модели по сравнению с моделью SA. Вихревые структуры заданной части также имеют некоторые различия.

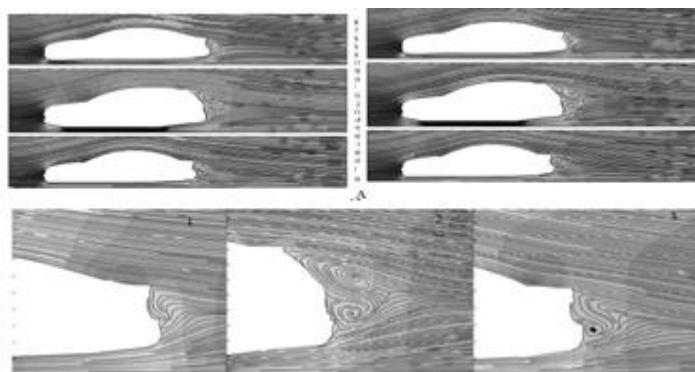


Рис. 2. А - Поле давления и мгновенные линии тока после «корпуса» (сверху). Расчеты с моделями SA (слева) и *k-ε* (справа). Б - Вихревая структура задней части корпуса. Расчет с моделью SA (1-Malibu-2, 2-Captiva,3-Cruze)

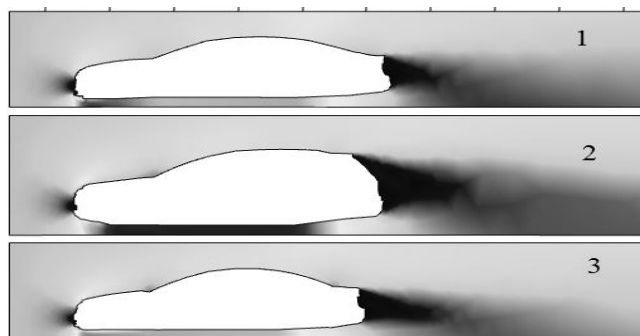


Рис. 3. Поле скоростей. Расчет с моделью SA (1-Malibu-2, 2-Captiva,3-Cruze)

Заключение

Проведено численное моделирование обтекания автомобилей (Malibu-2, Captiva, Cruze) при скорости набегающего потока $V=100$ км/час и угла атаки $\alpha=0$ по осреднённым уравнениям Навье–Стокса с моделями турбулентности Спаларта–Аллмараса и k-ε. Выполнено сравнение полученных данных. Показано, что результаты расчетов с моделями SA и k-ε вполне удовлетворительно согласуются друг с другом. Все расчёты были выполнены с помощью программы COMSOL Multiphysics 5.3a, это программа может быть использована для расчёта аэродинамики автомобилей.

Список литературы

1. Быков Л.В., Молчанов А.М., Щербаков М.А., Янышев Д.С. Вычислительная механика сплошных сред. М.: ЛЕНАНД, 2015. 688 с.
2. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. London: Academic Press, 1972. 169 p.
3. Allmaras S.R., Johnson F.T. and Spalart P.R. Modifications and Clarifications for the Implementation of the Spalart-Allmaras Turbulence Model / Seventh International Conference on CFD (ICCFD7). Big Island. Hawaii. 9-13 July, 2012.
4. Edwards J.R., Chandra S. Comparison of Eddy Viscosity-Transport Turbulence Models for Three-Dimensional, Shock-Separated Flowfields // AIAA Journal, 1996. Vol. 34. № 4. P. 756–763.
- 5.