

Р. П. Кушвид

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМОБИЛЯ НА ЕГО УПРАВЛЯЕМОСТЬ

Разработаны пространственная математическая модель аэродинамических сил и моментов, действующих на автомобиль при различных углах натекания воздушного потока, а также методика расчетного построения его обобщенной силовой диаграммы при действии потока, вызванного изменением направления движения автомобиля и действием ветра произвольного направления.

Управляемость скоростных транспортных средств, к числу которых относятся легковые автомобили, в значительной мере зависит от их аэродинамических свойств. Эти свойства определяются величинами аэродинамических сил и моментов, действующих на автомобиль при движении: силой лобового сопротивления P_x , боковой P_y и подъемной P_z силами, а также опрокидывающим моментом M_x , моментом тангажа M_y и рысканья M_z . Значения этих сил и моментов находят по результатам испытаний моделей или натуральных автомобилей в аэродинамических трубах, а затем по известным, приведенным в работе [1] формулам, пересчитывают в аэродинамические коэффициенты. В работах [1–3] исследуются различные проблемы аэродинамической устойчивости автомобиля и автомобиль рассматривается как система, состоящая из одного тела, и определяются достаточные условия для его устойчивого движения под действием аэродинамических сил и моментов. Аэродинамические силы считаются возмущенными, силы трения в пятне контакта шины с дорогой обеспечивают стабилизацию движения. Кинематические и динамические свойства подвески автомобиля считаются упрощенными. Вместе с тем, представляет научный интерес расчетная оценка влияния аэродинамических характеристик на управляемость автомобиля с учетом его конструктивных параметров и боковой составляющей натекания воздушного потока. Для решения этой задачи рассмотрим представленную математическую модель движения автомобиля в виде многотельной системы, состоящей из многих тел и включающей в себя детальное описание кинематики подвески, рулевого механизма и других агрегатов. Общий вид дифференциальных уравнений движения с кинематическими связями при таком подходе имеет форму уравнений Лагранжа первого рода. Дополним эти уравнения аэродинамическими силами и моментами в предположении, что эти силы и моменты действуют только на кузов автомобиля. В этом

случае уравнения движения автомобиля можно представить как

$$\begin{aligned} M_c \ddot{x}_c - D_p^T p &= f_a(x_a, \dot{x}_a) + f_c(x, \dot{x}, t); \\ M_s \ddot{x}_s - D_s^T p &= f_s(x, \dot{x}, t); \\ D_c \ddot{x}_c + D_s \ddot{x}_s &= h(x, \dot{x}). \end{aligned} \quad (1)$$

В системе (1) приняты следующие обозначения: \ddot{x}_c — вектор-столбец координат, определяющих положение центра масс кузова автомобиля и его ориентацию. Для пространственного случая размерность вектора равна 6 и складывается из трех поступательных координат и трех вращательных. Поступательные координаты — продольное, поперечное и вертикальное перемещения — в неподвижной системе. Вращательные координаты в случае пространственного движения не имеют строгого физического смысла. В уравнение движения они входят в виде проекции угловых ускорений и скоростей кузова на связанную с ним систему координат: \ddot{x}_s — вектор-столбец координат тел модели, исключая кузов. Размерность этого вектора определяется количеством тел в модели; p — вектор реакций в кинематических связях (шарнирах модели); $x = x_c + x_s$ — полный вектор координат системы; M_c — матрица инерции кузова как твердого тела, которая считается диагональной, в предположении, что главные центральные оси инерции близки к естественным осям симметрии автомобиля; M_s — диагональная матрица инерции тел модели за исключением кузова; D_c — подматрица коэффициентов уравнений связей в координатах кузова x_c ; D_s — подматрица коэффициентов уравнений связей (без кузова); $f_c(x, \dot{x}, t)$ — вектор сил податливых связей и сил нагрузок, действующих на кузов автомобиля; $f_s(x, \dot{x}, t)$ — вектор сил податливых связей и нагрузок, действующих на остальные тела модели автомобиля, он включает в себя как силы со стороны кузова, так и силы взаимодействия между остальными телами модели автомобиля; $h(x, \dot{x})$ — вектор правых частей уравнений связей; $f_a(x_c, \dot{x}_c)$ — вектор аэродинамических сил и моментов, действующих на кузов автомобиля.

Компоненты системы (1), кроме вектора аэродинамических сил, автоматически учитываются при генерации уравнений движения в системе моделирования ФРУНД [4], с помощью которой решается математическая модель динамики автомобиля. Следовательно, для исследования управляемости автомобиля необходимо знать вид функций, входящих в вектор аэродинамических воздействий на кузов. Кроме того, поскольку лобовое сопротивление автомобиля на больших скоростях составляет большую часть сопротивления движению автомобиля, то включение в модель динамики аэродинамических сил требует также введения тяговых сил на колесах. Рассмотрим функциональное представление аэро-

динамических сил. Вектор аэродинамических сил в общем случае содержит шесть составляющих — три силы и три момента [1]. Такой вектор в проекции на неподвижную систему координат можно записать в форме

$$f_a(x_c, \dot{x}_c) = \begin{bmatrix} P_a A_c^T \\ M_a \end{bmatrix}.$$

Здесь P_a — вектор сил лобового сопротивления, боковой силы, подъемной силы; M_a — вектор, компонентами которого являются опрокидывающий момент, поворачивающий момент и момент рысканья; A_c^T — матрица преобразования из связанной системы координат кузова в неподвижную систему координат. Компоненты векторов аэродинамических сил и моментов определяются по хорошо отработанным и экспериментально проверенным формулам [1].

Предлагаемая и описываемая системой уравнений (1) модель динамики автомобиля имеет более общий характер, так как полностью охватывает все возможные направления движения автомобиля. Скорость автомобиля в этом случае задается скоростями центра масс кузова в абсолютной (неподвижной) системе координат. Поэтому, вместо приведенных в технической литературе выражений для определения скорости невозмущенного потока, более удобно использовать следующую зависимость:

$$V_\infty = \sqrt{(V_x^a + V_{wx}^a)^2 + (V_y^a + V_{wy}^a)^2};$$

здесь V_x^a, V_y^a — проекции скоростей центра масс кузова на абсолютную систему координат; V_{wx}^a, V_{wy}^a — проекции ветрового потока на эту же систему. Угол натекания потока можно определить как угол между продольной осью автомобиля и вектором воздушного потока в системе координат кузова. Направление продольной оси кузова задается вектором

$$n_x^a = A_c^T n_x,$$

где $n_x = (1, 0, 0)^T$.

Направление воздушного потока в абсолютной системе координат определяется следующим образом:

$$V_f^a = \begin{bmatrix} V_x^a + V_{wx}^a \\ V_y^a + V_{wy}^a \\ V_z^a + V_{wz}^a \end{bmatrix}.$$

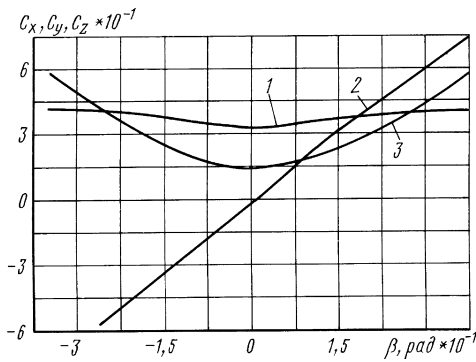


Рис. 1. Зависимость аэродинамических коэффициентов C_x , C_y , C_z автомобиля ВАЗ 21103 от угла натекания воздушного потока:

1 — $C_x = f(\beta)$; 2 — $C_y = f(\beta)$; 3 — $C_z = f(\beta)$

— порядка $15^\circ - 20^\circ$. Предлагаемая система уравнений (1) справедлива для любой ориентации движения автомобиля и позволяет описывать динамику криволинейного движения автомобиля, учитывая воздействия воздушной среды. Определим типичные значения аэродинамических коэффициентов автомобилей ВАЗ по экспериментальным данным, полученным в аэродинамической трубе при скорости потока 40 м/с. При испытаниях в аэродинамической трубе за центр приведения принимали точку, лежащую на линии продольной симметрии и расположенную между мостами автомобиля. Зависимости аэродинамических коэффициентов сопротивления от угла натекания потока для автомобиля ВАЗ 21013 приведены на рис. 1. Анализируя зависимости аэродинамических коэффициентов от угла натекания потока ветра, выявили, что в расчетах нельзя ограничиваться их постоянными значениями, а целесообразно использовать интерполяцию. В зависимости от типа коэффициента можно предложить следующие выражения:

$$C_x = C_{x0} + C_{x\beta}|\beta|; \quad (2)$$

$$C_y = C_{y0} + C_{y\beta}\beta; \quad (3)$$

$$C_z = C_{z0} + C_{z\beta}|\beta|; \quad (4)$$

$$m_x = m_{x0} + m_{x\beta}\beta; \quad (5)$$

$$m_y = m_{y0} + m_{y\beta}|\beta|; \quad (6)$$

$$m_z = m_{z0} + m_{z\beta}\beta. \quad (7)$$

В выражениях (2)–(7) нижний индекс “0” означает величину аэродинамического коэффициента при осесимметричном натекании потока,

Выражение для угла натекания воздушного потока можно представить в виде

$$\cos \beta = \frac{n_x^a \cdot V_f^a}{|n_x^a| |V_f^a|}.$$

Координаты точки приложения аэродинамических сил и моментов зависят от методики их экспериментального определения. В аэродинамике обычно принимают, что угол натекания воздушного потока бокового ветра при эксплуатации автомобиля составляет небольшую величину

а индекс β — коэффициент, учитывающий влияние угла натекания потока. Как следует из рис. 1, зависимость коэффициентов от угла β может быть линейной и параболической. Для интерполяции параболической зависимости в небольшом диапазоне изменения углов натекания потока используется модуль β .

По представленным на рис. 1 графикам определены и приведены в таблице коэффициенты, входящие в выражения (2)–(7).

Таблица

Экспериментальные значения аэродинамических коэффициентов, входящих в выражения (2)–(7) для ряда автомобилей ВАЗ

Марка автомобиля	C_{x0}	$C_{x\beta}$	C_{y0}	$C_{y\beta}$	C_{z0}	$C_{z\beta}$	m_{x0}	$m_{x\beta}$	m_{y0}	$m_{y\beta}$	m_{z0}	$m_{z\beta}$	B_x	B_y	F
ВАЗ 21103	0,32	0,3	0	2,07	0,14	1,2	0	-0,81	0,01	0,1	0	-0,47	2,45	1,4	1,98
ВАЗ 2123	0,46	0,26	0	2,23	0,18	0,7	0	-1,16	0,02	0,15	0	-0,2	2,46	1,46	2,49
ВАЗ 2113	0,43	0,31	0	2,55	0,084	1,08	0	-1,03	0,02	-0,1	0	-0,39	2,46	1,39	1,89
ВАЗ 21103, смещение центра приведения $Z = 0,6$	0,32	0,3	0	2,07	0,14	1,2	0	-2,1	0,21	0,28	0	-0,5	2,45	1,4	1,98
ВАЗ 21103, смещение центра приведения $X = -0,5, Z = 0,6$	0,32	0,3	0	2,07	0,14	1,2	0	-2,1	0,28	0,88	0	-1,5	2,45	1,4	1,98

Форма кузова автомобиля влияет как на величину аэродинамического сопротивления, так и на характер его изменения при варьировании угла натекания. Для установления общих закономерностей проведен анализ аэродинамического сопротивления для трех автомобилей — ВАЗ 21103, ВАЗ 2113 и ВАЗ 2123. На рис. 2 приведены зависимости изменения коэффициента лобового сопротивления от угла натекания. По этому параметру рассматриваемые автомобили отличаются только

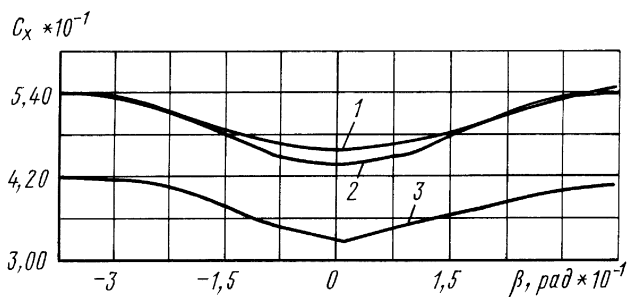


Рис. 2. Зависимость коэффициента C_x от угла натекания потока для автомобилей ВАЗ 21103 (1); ВАЗ 2113 (2); ВАЗ 2123 (3)

его начальными значениями, нарастание же сопротивления при увеличении угла примерно одинаково. Изменение коэффициента подъемной силы характеризуется тем, что его малое значение при нулевом угле натекания (в автомобилях ВАЗ 21103 и ВАЗ 2113) вызывает более интенсивный рост коэффициента при увеличении угла натекания (в автомобиле ВАЗ 2123 наблюдается обратная зависимость). Коэффициент m_x момента крена растет более интенсивно для автомобилей с большим лобовым сопротивлением — (см. таблицу). Коэффициент аэродинамического момента относительно поперечной оси автомобиля может изменяться по-разному. Так для автомобилей ВАЗ 21103 и ВАЗ 2123 он растет с увеличением угла натекания, а для ВАЗ 2113 — наоборот падает. Аэродинамический момент относительно вертикальной оси для менее обтекаемого кузова (ВАЗ 2123) растет медленнее, чем для автомобилей с обтекаемым кузовом (рис. 3).

В соответствии с изложенным способом представления аэродинамических сил и моментов в компьютерную систему моделирования ди-

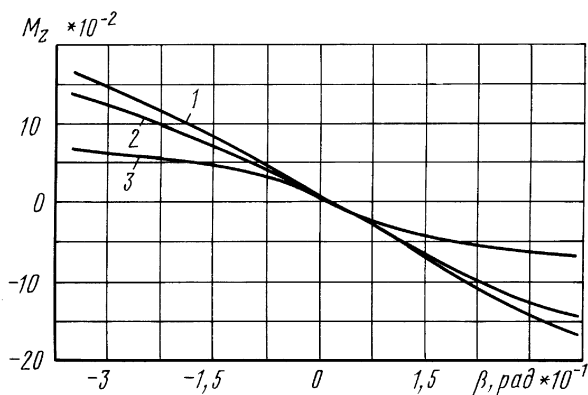


Рис. 3. Зависимость коэффициента m_z от угла натекания потока для автомобилей ВАЗ 21103 (1); ВАЗ 2113 (2); ВАЗ 2123 (3)

намики машин ФРУНД был введен модуль их расчета с его использованием для анализа влияния аэродинамики на управляемость автомобиля. На примере автомобиля ВАЗ 2123 был рассчитан маневр “переставка” на скорости 80 км/ч. Для выполнения этого маневра был подобран соответствующий закон поворота рулевого колеса автомобиля. Длина переходного участка маневра “переставка” составляла 30 м, боковое смещение — 3 м. Расчеты проводились при коэффициенте сцепления 0,7. Влияние аэродинамических сил и моментов оценивалось по графикам поперечного смещения автомобиля.

Были также рассмотрены параметры движения автомобиля при совершении маневра “переставка” в случае наличия дополнительной ветровой нагрузки. Ветровая нагрузка в модели аэродинамических сил задается отдельно в продольном и боковом направлениях. Направление продольного ветрового потока может быть встречным или попутным, поперечного потока — левым или правым.

Для оценки влияния отдельных составляющих аэродинамических сил и моментов на боковое смещение были рассчитаны маневры при действии только одного аэродинамического компонента. В расчетах принимали, что отличны от нуля только некоторые аэродинамические коэффициенты. На рис. 4 изображены боковые смещения автомобиля при учете отдельных аэродинамических сил. Рассмотрим случай ветровой нагрузки слева. Как видно из графика, большую часть реакции автомобиля определяют поперечная сила и моменты относительно продольной и вертикальной осей. При этом основной вклад вносит

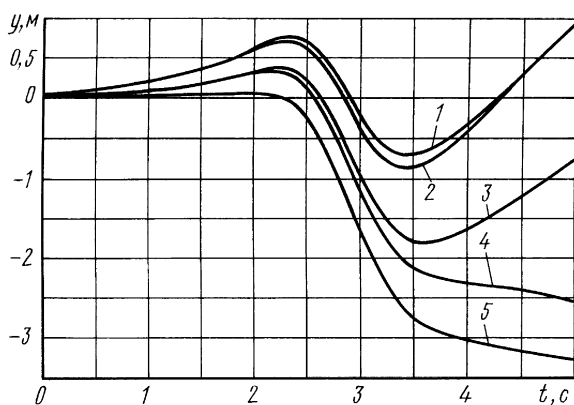


Рис. 4. Боковое смещение автомобиля ВАЗ 2123 при маневре “переставка” в зависимости от действия отдельных компонентов аэродинамического воздействия, скорость автомобиля 80 км/ч:

1 — боковой ветер отсутствует; 2 — ветер слева, 10 м/с; 3 — ветер слева, 10 м/с (с учетом влияния C_y, m_x, m_z); 4 — ветер слева, 10 м/с (с учетом влияния только m_z); 5 — ветер слева, 10 м/с (с учетом влияния только C_y)

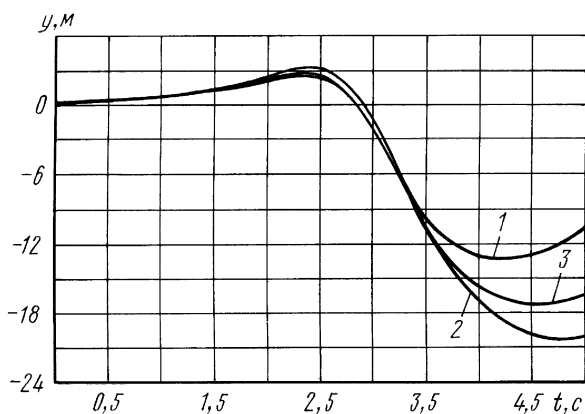


Рис. 5. Боковое смещение автомобиля ВАЗ 2123 при “переставке” в зависимости от типа привода, скорость 160 км/ч:

1 — передний привод; 2 — задний привод; 3 — полный привод

аэродинамический момент относительно вертикальной оси, а влияние боковой силы значительно меньше. Следует отметить, что знак вертикального момента зависит от формы кузова автомобиля, поэтому траектория движения автомобиля может меняться при одном и том же направлении ветровой нагрузки. При воздействии на автомобиль аэродинамических сил и моментов на траекторию его движения может оказывать влияние и тип привода ведущих колес. Для оценки влияния этого фактора на математической модели были проведены расчеты маневра “переставка” автомобиля с тремя типами привода — передним, задним и полным. Силы тяги на колесах выбирались из условий компенсации сил аэродинамического сопротивления и обеспечения движения автомобиля с постоянной скоростью на прямолинейном участке. Расчеты показали, что на небольших скоростях (порядка 80 км/ч) влияние типа привода несущественно; при движении автомобиля с большей скоростью его влияние становится значительным. На рис. 5 показаны зависимости поперечного смещения автомобиля при выполнении маневра “переставка” на скорости 160 км/ч. Такие скорости могут быть реальными, например, для спортивных автомобилей. Полная сила тяги на колесах в таком режиме составила 1300 Н. Как видно из графиков, этом случае большую чувствительность к управлению имеет автомобиль с передним приводом, а меньшую — с задним. Полноприводной автомобиль, как и в случае скорости 80 км/ч, занимает промежуточное положение.

Анализируя влияние аэродинамических свойств автомобиля на его управляемость при выполнении маневра “переставка”, выявили качественные закономерности. Для получения сравнительных характери-

стик следует распространить понятие обобщенной силовой диаграммы $C_N - A_y$ и на математическую модель, учитывающую пространственно-шестикомпонентное аэродинамическое воздействие на автомобиль. Особенности построения обобщенной силовой диаграммы для компьютерной модели автомобиля, учитывающей аэродинамические силы, обуславливаются большей величиной сопротивления движению автомобиля и наличием боковой ветровой нагрузки. Постоянство скорости обеспечивается блоком моделирования привода, который вычисляет тяговые силы на колесах для поддержания постоянной скорости. Скорость бокового ветрового потока при расчете обобщенной диаграммы должна быть всегда направлена перпендикулярно продольной оси автомобиля. С физической точки зрения это обстоятельство носит искусственный характер, но необходимо для корректного построения обобщенной диаграммы.

Для анализа влияния аэродинамических сил на автомобиль с помощью обобщенных силовых диаграмм строится одна кривая, т.е. линия равных углов поворота рулевого колеса при нулевом значении самого угла поворота (управляемые колеса движутся прямо). По характеру такой линии можно судить о свойствах автомобиля, связанных с устойчивостью и управляемостью. На малых скоростях движения (80 км/ч) влияние аэродинамических свойств автомобиля отчетливо проявляется только при боковой ветровой нагрузке (рис. 6). Влияние лобового сопротивления, как показали расчеты, при этом незначительно. В зависимости от направления боковой ветровой нагрузки линия равных углов поворота руля смещается по оси приведенного бокового ускорения на величину, определяемую возникающими поперечными аэродинамическими силами. Боковой ветер, действующий на внутренний борт со

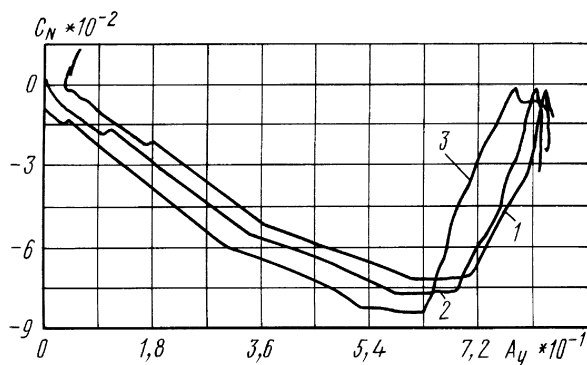


Рис. 6. $C_N - A_y$ -диаграмма, линия нулевого угла поворота руля с учетом аэродинамического воздействия:

1 — боковой ветер отсутствует; 2 — ветер слева, 10 м/с; 3 — ветер справа, 10 м/с

скоростью 10 м/с в повороте, снижает максимально достижимые поперечные ускорения примерно на 10 %. Автомобиль раньше переходит на управляемый режим скольжения. Ветровая нагрузка на наружный борт незначительно изменяет величину критического бокового ускорения автомобиля. В соответствии с этим дальнейший анализ будем проводить для случая действия бокового ветра на внутренний борт.

На более высоких скоростях движения, влияние аэродинамических свойств проявляется сильнее. На скорости 120 км/ч при боковом ветре 10 м/с граничные поперечные ускорения перехода в скольжение уменьшаются на 20–25 %. С ростом скорости уменьшается наклон линии равных углов, т.е. уменьшается чувствительность к управлению. Вместе с тем, влияние ветровой нагрузки на автомобиль увеличивается. При скорости 160 км/ч критические поперечные ускорения снижаются почти на 40 %. Величину поперечных ускорений, при которых автомобиль входит в неуправляемое скольжение, можно трактовать как показатель устойчивости движения автомобиля при действии ветровой нагрузки. Следовательно, в качестве одного из критериев аэродинамической устойчивости можно предложить величину боковых ускорений, вызываемых силой ветра, действующего на автомобиль от мгновенного центра поворота, при которой автомобиль входит в неуправляемое скольжение. Снижение граничных ускорений уменьшает область допустимых управляющих воздействий на автомобиль и повышает вероятность потери управления автомобилем. Это явление происходит на всех скоростях движения автомобиля, но на скорости 160 км/ч оно сильнее всего выражено, что наглядно иллюстрирует диаграмма $C_N - A_y$. Поэтому рассмотрим факторы, влияющие на этот показатель при данной скорости. К факторам, влияющим на граничные режимы движения, относятся собственно аэродинамика автомобиля, форма кузова и его конструктивные особенности, в частности тип привода. Ранее принимали, что привод автомобиля осуществляется на все колеса. Рассмотрим влияние приводов других типов на устойчивость движения. Анализ показал, что передний привод имеет наименьшие граничные ускорения срыва в неуправляемое движение, задний привод — наибольшие. Разница по таким ускорениям между передним и задним приводом составляет около 25 %. Передний привод обеспечивает на 30–40 % большую чувствительность к управлению.

Для оценки влияния формы кузова на устойчивость были проведены расчеты переднеприводной модели ВАЗ 2123 с четырьмя различными наборами аэродинамических коэффициентов (см. таблицу). Раздельное варьирование отдельных коэффициентов не всегда имеет смысл, поскольку аэродинамические силы и моменты, определяемые

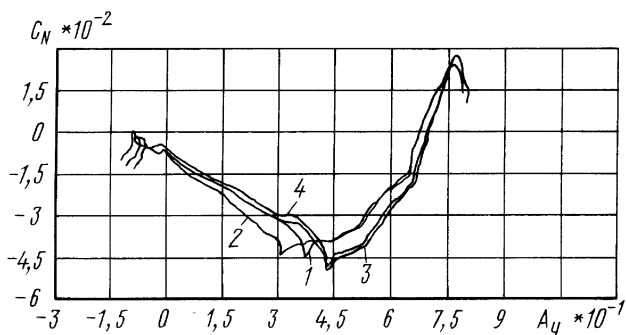


Рис. 7. $C_N - A_y$ -диаграмма для автомобилей ВАЗ 2123 с измененной аэродинамикой (1); ВАЗ 2123 (2); ВАЗ 21103 (3); ВАЗ 2113 (4)

экспериментально, получаются для заданного центра приведения, а изменение коэффициентов моментов означает изменение коэффициентов сил, которые могут влиять на этот момент, и наоборот. Поэтому были рассчитаны три варианта с аэродинамикой, соответствующей автомобилям ВАЗ 2123, ВАЗ 21103 и ВАЗ 2113 с массой по 1500 кг. Кроме того, был рассчитан вариант с измененными коэффициентами (ВАЗ 2123). Изменения касались коэффициента $m_{z\beta}$, который был увеличен с 0,2 до 0,5.

Результаты расчетов показаны на рис. 7, из которого видно, что аэродинамические свойства кузовов автомобилей ВАЗ 21103 и ВАЗ 2113 обеспечивают большее, примерно на 25 %, критическое боковое ускорение, по сравнению с автомобилем ВАЗ 2123. Основным фактором, влияющим на это, является коэффициент изменения момента относительно вертикальной оси в зависимости от угла натекания потока, который для ВАЗ 2123 почти в 2 раза меньше, чем у двух других автомобилей. Вместе с тем, нужно отметить, что более обтекаемая форма кузова (ВАЗ 21103 и ВАЗ 2113) уменьшает чувствительность к управлению — меньший наклон кривых равных углов. Это подтверждается также сравнением вариантов с различными коэффициентами зависимости вертикального момента от угла натекания потока — $m_{z\beta}$. При большем $m_{z\beta}$ (автомобиль менее обтекаемый) срыв в неуправляемый поворот происходит при больших боковых ускорениях.

Заключение. 1. Разработанная пространственная математическая модель аэродинамических сил и моментов, действующих на автомобиль при различных углах натекания потока, включена в комплекс моделирования динамики автомобиля и позволяет проводить анализ криволинейного движения автомобиля с учетом нелинейностей кинематики подвески, ее жесткостных и демпфирующих свойств. Проведенный анализ устойчивости и управляемости автомобиля ВАЗ 2123, показал

значительное влияние аэродинамических свойств кузова автомобиля на его управляемость и устойчивость при скоростях более 80 – 100 км/ч и ветровом воздействии.

2. Разработана методика расчетного построения обобщенной силовой диаграммы автомобиля при действии воздушного потока, вызванного изменением направления движения автомобиля и ветровым воздействием произвольного направления. Обобщенная силовая диаграмма, в случае учета аэродинамического воздействия, позволяет получить количественную оценку влияния конструктивных и аэродинамических параметров автомобиля на его управляемость. Величины боковых ускорений, вызываемых силой ветра, действующего на автомобиль от центра поворота, при которых автомобиль входит в неуправляемое скольжение, могут быть предложены в качестве одного из критериев оценки аэродинамической устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е в г р а ф о в А. Н., В ы с о ц к и й М. С. Аэродинамика колесного транспорта. – Мн.: Наука и техника, 2001. – 368 с.
2. А э р о д и н а м и к а автомобиля / В.Г. Гухо. Пер. с нем., под ред. С.П. Загородникова. – М.: Машиностроение, 1987. – 422 с.
3. I m p a c t of Aerodynamics on vehicle Design // Inderscience Enterprises Ltd., UK. Copyright, 1983. – 430 с.
4. Г о р о б ц о в А. С., К а р ц о в С. К. Опыт компьютерного моделирования вибрации конструкций транспортных средств // Труды Пятой международной конференции по проблемам колебаний “ICOVP-2001”. – Москва. – 2001. – С. 186–190.

Статья поступила в редакцию 26.04.04

Рубен Петрович Кушвид родился в 1935 г., окончил в 1964 г. Московский автомеханический институт. Канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Автомобили и двигатели” Московского государственного индустриального университета. Автор более 40 научных работ в области управляемости и устойчивости автомобиля.

R.P. Kushvid (b. 1935) graduated from the Moscow Automotive Mechanical Institute in 1964. Ph. D. (Eng.), professor, head of “Automobiles and Engines” department of the Moscow State Industrial University. Author of more than 40 publications in the field of automobile controllability and stability.