

Научная статья  
УДК 629.113; 621.432

## Особенности определения коэффициента аэродинамического сопротивления автомобиля и его влияния на расход топлива

Александр Сергеевич Стряпунин<sup>1</sup>, Эдуард Андреевич Савастенко<sup>2</sup>,  
Владимир Романович Филиппов<sup>3</sup>, Евгения Максимовна Филиппова<sup>4</sup>,  
Булат Ильнурович Хазиев<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
Москва, Россия

<sup>1</sup>alex.s.study@mail.ru

<sup>2</sup>e.d.u.a.r.d@inbox.ru

<sup>3</sup>filay.rus@gmail.com

<sup>4</sup>dasistzhenia@yandex.ru

<sup>5</sup>mr.xaziev111@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается определение коэффициента аэродинамического сопротивления автомобиля с помощью CFD-моделирования и экспериментальным методом свободного выбега. Изучено влияние коэффициента  $C_x$  на расход топлива транспортного средства. Исследование проводилось на автомобиле Nissan Terrano 3. Компьютерное моделирование выполнено с использованием отечественного CFD-модуля FlowVision. Рассмотрены особенности формирования модели. Отдельное внимание уделено подбору настроек солвера и адаптации расчётной сетки на примере верификационной модели – тело Ахмеда. Представлены результаты расчёта в форме визуализации, в численных значениях и графическом виде. Получены значения сил, действующих на элементы автомобиля, и коэффициенты  $C_x$  при обтекании со скоростью 57 км/ч. Экспериментальным путём с помощью эмпирических зависимостей определён коэффициент  $C_x$ . Дано обоснование по расхождению результатов расчёта и эксперимента, связанное с допущениями в геометрии автомобиля и граничных условиях при моделировании. Установлено влияние коэффициента на мощность, затрачиваемую на аэродинамическое сопротивление. При уменьшении коэффициента  $C_x$  на 0,05, затрачиваемая мощность снижается на 12%. Также выявлено влияние данного коэффициента на расход топлива транспортного средства.

**Ключевые слова:** коэффициент аэродинамического сопротивления, расход топлива, обтекание автомобиля, CFD моделирование.

**Для цитирования:** Стряпунин А.С., Савастенко Э.А., Филиппов В.Р., Филиппова Е.М., Хазиев Б.И. Особенности определения коэффициента аэродинамического сопротивления автомобиля и его влияния на расход топлива // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 2 (40).

Original article

## Features of determining the car aerodynamic drag coefficient and its influence on fuel consumption

Alexander S. Stryapunin<sup>1</sup>, Eduard A. Savastenko<sup>2</sup>, Vladimir R. Filippov<sup>3</sup>,  
Evgenia M. Filippova<sup>4</sup>, Bulat I. Khaziev<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),  
Moscow, Russia

<sup>1</sup>alex.s.study@mail.ru

<sup>2</sup>e.d.u.a.r.d@inbox.ru

<sup>3</sup>filay.rus@gmail.com

<sup>4</sup>dasistzhenia@yandex.ru

<sup>5</sup>mr.xaziev111@mail.ru

**Abstract.** The article discusses the determination of the aerodynamic drag coefficient of a car using CFD modeling and the experimental free run method. The influence of the  $C_x$  coefficient on vehicle fuel consumption has been studied. The study was carried out on a Nissan Terrano 3. Computer modeling was performed using the domestic FlowVision CFD module. The features of the formation of the model are considered. Special attention is paid to the selection of solver settings and adaptation of the computational grid using the example of a verification model - the Ahmed body. The calculation results are presented in the form of visualization, in numerical values and graphical form. The values of the forces acting on the elements of the car and the coefficients  $C_x$  for flow around at a speed of 57 km/h were obtained. The coefficient  $C_x$  was determined experimentally using empirical dependencies. A justification is given for the discrepancy between the results of calculation and experiment related to assumptions in the geometry of the car and boundary conditions during modeling. The influence of the coefficient on the power expended on aerodynamic drag has been established. When the  $C_x$  coefficient decreases by 0,05, the consumed power is reduced by 12%. The influence of this coefficient on vehicle fuel consumption was also revealed.

**Keywords:** aerodynamic drag coefficient, fuel consumption, flow around a vehicle, CFD modeling.

**For citation:** Stryapunin A.S., Savastenko E.A., Filippov V.R., Filippova E.M., Khaziev B.I. Features of determining the car aerodynamic drag coefficient and its influence on fuel consumption. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. No. 2 (40).

### Введение

На сегодняшний день вопрос экономии топлива в сфере автомобильного транспорта стоит достаточно остро. Учёные и производители силовых установок различными методами пытаются снизить потребление топлива двигателем внутреннего сгорания [1], в том числе, путём применения различных альтернативных топлив [2]. Дополнительную сложность оказывает тот факт, что концепция разработки платформ, предполагает использование одного силового агрегата в различных транспортных средствах. Так, двигатель, установленный в кроссовере или минивэне, при прочих равных, будет потреблять больше топлива, чем в составе седана или купе. Причиной этому является не только масса автомобиля, но и коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_x$  кузова. Данный коэффициент существенно влияет на мощность, затрачиваемую на преодоление аэродинамического сопротивления, особенно на скоростях более 80 км/ч. Поэтому, для прогнозирования уровня расхода топлива транспортного средства на ранних стадиях разработки, требуется определять не только характеристики отдельно взятого ДВС, но также типа кузова и трансмиссии шасси, на которое он будет устанавливаться. В данной работе рассмотрен вопрос определения коэффициента аэродинамического сопротивления автомобиля  $C_x$  с помощью CFD-моделирования и экспериментального метода, а также его влияния на расход топлива.

### Верификация модели обтекания тела

Современные методы моделирования и вычислительные мощности компьютеров позволяют с большой достоверностью оперативно определять коэффициент  $C_x$  на основе 3D геометрии, что позволяет выявлять проблемные места и, при необходимости, изменять форму кузова или его навесных элементов для достижения требуемых аэродинамических характеристик.

При проведении расчётов в данной работе использовался российский программный комплекс *FlowVision*, который неоднократно подтверждал свою эффективность и точность при расчётах [3].

Перед моделированием обтекания сложного тела (кузов автомобиля), необходимо подобрать настройки солвера и уровень адаптации расчётной сетки на более простом верификационном примере. В автомобильной промышленности для этой задачи используют стандартную модель – тело Ахмеда [4] (рис. 1).

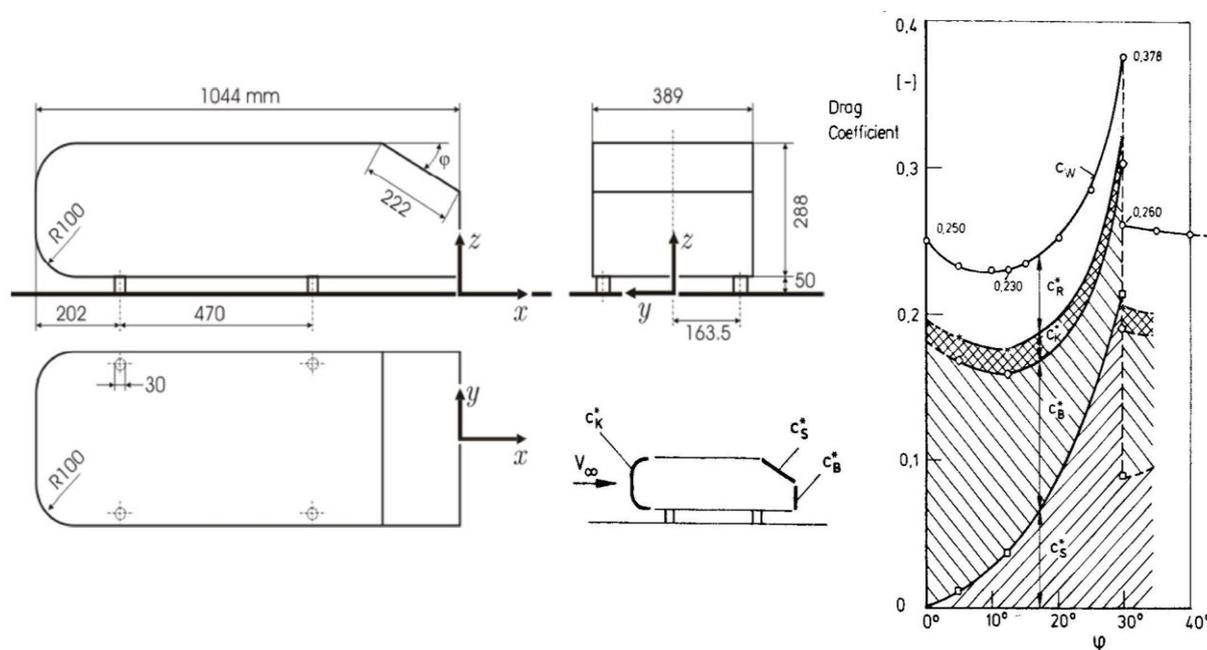


Рис. 1. Геометрия тела Ахмеда и его коэффициент  $C_x$  в зависимости от угла скоса

С целью экономии ресурсов расчёт велся только для половины тела [5]. Размер расчётной области составил 1,2 x 2,0 x 5,5 м. Размер ячейки начальной расчётной сетки – 0,05 м. По поверхности всего тела применена адаптация 4-го уровня по 10 слоёв для каждого уровня (рис. 2). Итоговое количество расчётных ячеек – 1 360 000. Модель турбулентности – *KES*, расчётный шаг задавался числом  $CFL = 20$ . Скорость воздушного потока на входе = 60 м/с.

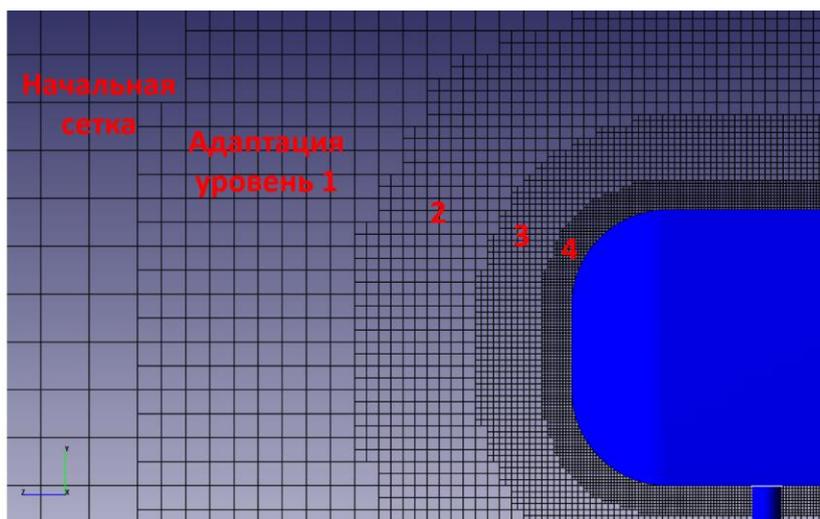


Рис. 2. Начальная сетка и её адаптация по поверхности тела

Коэффициент аэродинамического сопротивления определялся по формуле:

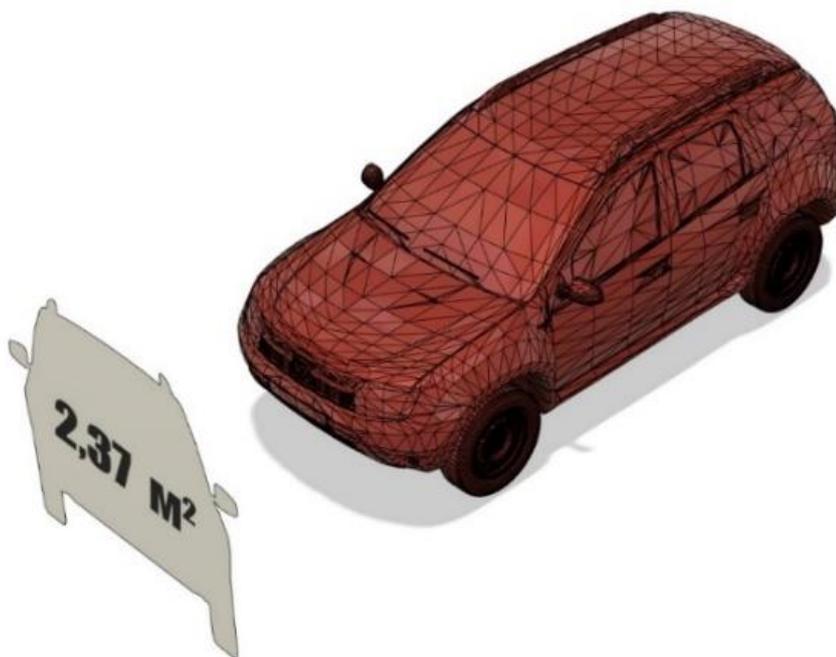
$$C_x = \frac{2 * F_x}{A * \rho * v^2}, \quad (1)$$

где  $F_x$  – сила сопротивления воздушного потока, Н;  $A$  – площадь миделева сечения, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность окружающей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость движения набегающего потока, м/с.

Итоговые результаты показали точность 2...18%, что, при условии времени расчёта менее 2-х часов на 16 ядрах, является приемлемым результатом для начальных этапов проектирования, когда скорость расчёта приоритетнее точности.

## Моделирование обтекания автомобиля

В качестве объекта исследования взят автомобиль Nissan Terrano 3 ( $C_x = 0,42 [-]$ ,  $A = 2,37 [м^2]$ ). Выбор данного транспортного средства был обусловлен возможностью проведения экспериментального исследования на реальном автомобиле. Для проведения моделирования в открытом доступе выбрана и доработана подходящая 3D модель исследуемого автомобиля (рис. 3).



*Рис. 3. Внешний вид поверхностной модели автомобиля Nissan Terrano 3 и его миделево сечение*

Размер расчётной области  $4 \times 4 \times 14$  м, как и в случае с телом Ахмеда в неё была вписана только половина автомобиля, а для второй половины наложена зависимость зеркальности. Грань начальной расчётной сетки – 0,1 м. Итоговое количество расчётных ячеек с учётом всех адаптаций составило 5 770 000.

Результаты моделирования при обтекании автомобиля потоком воздуха со скоростью 16 м/с представлены на рис. 4 и 5.

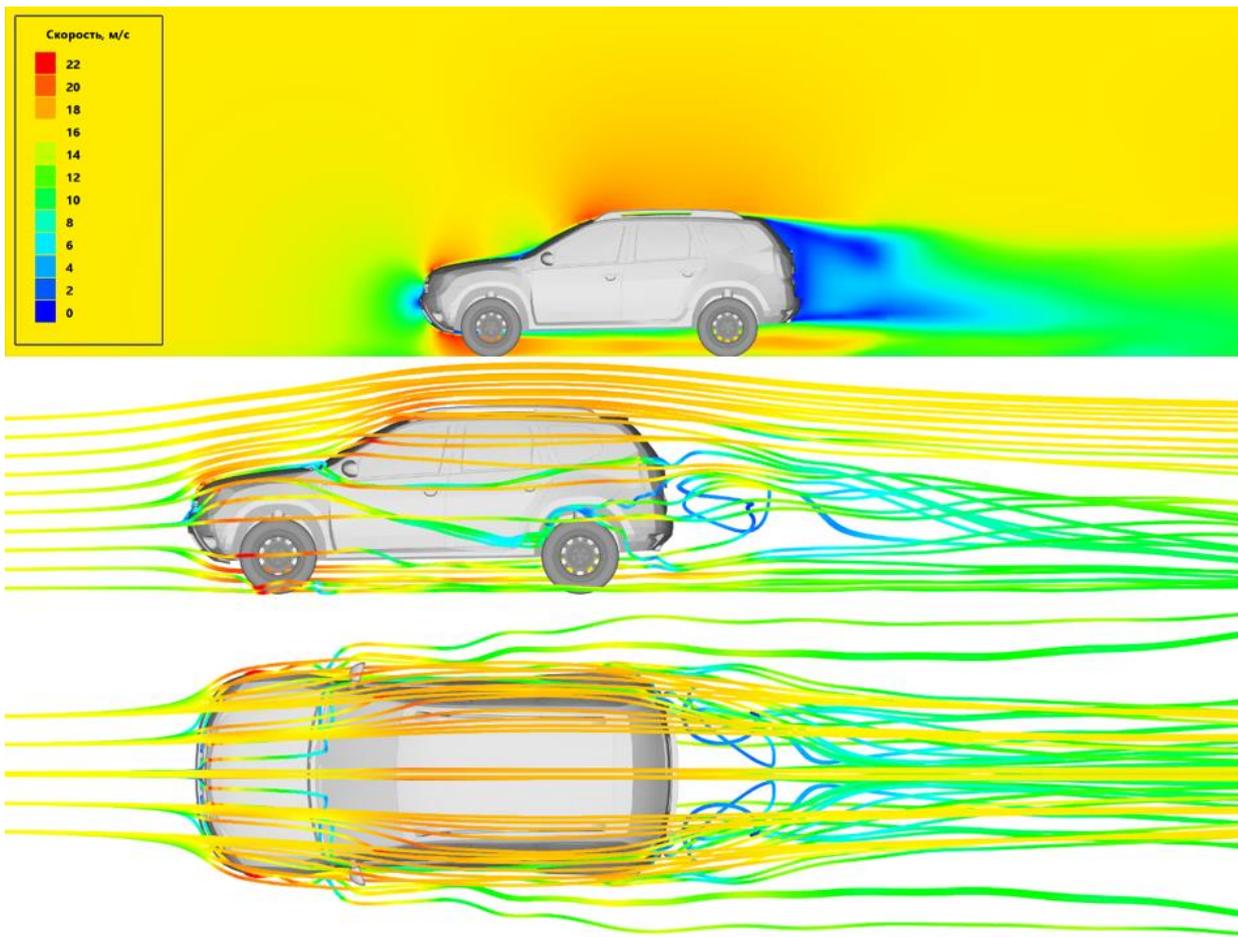


Рис. 4. Градиент скорости и линии тока при обтекании кузова ( $v = 16$  м/с)



Рис. 5. Сходимость коэффициента  $C_x$  в процессе расчёта

Итоговая величина коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_x$  составила 0,37, расхождение с “паспортным” значением – 12%. Это обусловлено тем, что решётка радиатора в представленной модели не имеет сквозных отверстий, а представляет собой глухую стенку. Днище автомобиля полностью плоское, что также в значительной мере снижает сопротивление. С учётом этих допущений, модель показала приемлемую точность для первичного определения коэффициента сопротивления. Для дальнейшего увеличения точности в модель требуется добавить имитацию подкапотного пространства, а также компонентов, находящихся под днищем кузова.

К схожим выводам пришли авторы статьи [6], которые рассматривали влияние аэродинамических элементов на днище кузова автомобиля Renault Duster (копия Nissan Terrano). В своих расчётах они использовали ещё более упрощённую геометрию и получили  $C_x = 0,357$ .

Другой возможной причиной отклонения расчётной величины от реальной может быть отсутствие учёта вращения колёс и движения дорожного полотна. В ПК *FlowVision* имеется возможность задавать такие условия, однако, это требует полного пересмотра настроек солвера и, скорее всего, значительно увеличит время достижения сходимости.

### Экспериментальные исследования

Как известно, крупные автомобильные компании при разработке транспортных средств активно пользуются аэродинамическими трубами, в том числе, для точного определения коэффициента  $C_x$ . Однако такой метод требует наличия крайне дорогостоящего оборудования, а номенклатура возможных объектов испытаний ограничена техническими характеристиками установки.

Существует более простой и менее дорогостоящий метод экспериментального определения коэффициента аэродинамического сопротивления – на основе метода однократного выбега [7].

Последовательность проведения испытания следующая: автомобиль

разгоняется по прямой ровной дороге до определённой скорости, затем КПП переводится в нейтральную передачу и осуществляется движение накатом (рис. 6). С помощью диагностического сканера интерфейса OBDII (или других устройств) производится запись изменения скорости движения по времени. Из серии полученных результатов определяется среднее время и замедление в выбранных скоростных диапазонах. По эмпирической зависимости рассчитывается величина  $C_x$ :

$$C_x = \frac{6m(j_1 - j_2)}{\rho A(v_1^2 - v_2^2)}, \quad (2)$$

где  $m$  – полная масса автомобиля;  $j_1, j_2$  – средние замедления на первом и втором отрезке измерения скорости;  $\rho$  – плотность окружающей среды;  $A$  – площадь миделева сечения;  $v_1, v_2$  – средние скорости на первом участке и втором участке.



*Рис. 6. Замер времени замедления при экспериментальном определении коэффициента аэродинамического сопротивления*

В ходе натурных испытаний проведено более 80 заездов и посчитано 180 коэффициентов аэродинамического сопротивления. Результаты с большой погрешностью были исключены, а удовлетворительные данные были подвергнуты проверке на соответствие выборочного распределения нормальному распределению по критерию Пирсона, который получился

равным 1,3, что делает полученные данные корректными для использования (рис. 7).

V, км/ч	C <sub>x</sub>		
	Заезд 1	Заезд 2	Заезд 3
(70-60) (40-30)	0,45	0,51	0,47
(100-90) (30-20)	0,48	0,40	0,37
(100-90) (15-10)	0,54	0,43	0,43
(100-90) (20-15)	0,40	0,46	0,44
(100-95) (30-20)	0,50	0,43	0,44
(95-90) (40-30)	0,44	0,30	0,32
(100-95) (40-30)	0,48	0,41	0,41
(100-95) (30-20)	0,50	0,43	0,44
(80-70) (20-15)	0,36	0,39	0,11
(100-95) (30-20)	0,50	0,43	0,44
(100-95) (40-30)	0,48	0,41	0,41
(100-90) (40-30)	0,45	0,31	0,38

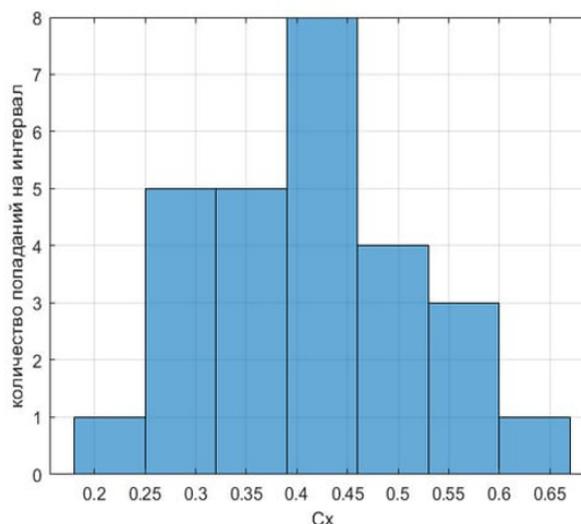


Рис. 7. Выборка результатов  $C_x$  и выборочное распределение по критерию Пирсона

Среднее значение коэффициента аэродинамического сопротивления, определённого экспериментальным путём,  $C_x=0,42$ , что соответствует заявленному производителем значению. Тем не менее следует отметить, что определение коэффициента методом свободного выбега требует хорошей организации проведения эксперимента: участок дороги должен быть прямым, а покрытие – без дефектов; заезды необходимо проводить в двух направлениях для исключения влияния ветра; все измерения должны фиксироваться автоматически [8]; масса автомобиля должна поддерживаться постоянной (учитывать количество расходуемого топлива в баке) и т.д. Все эти условия оказывают существенное влияние на получаемое значение коэффициента аэродинамического сопротивления. Также, большое внимание необходимо уделять обработке полученных значений. В связи с этим, данная методика является достаточно трудо- и время затратной, а также требующей наличие объекта испытаний. Так что на ранних стадиях проектирования предпочтительнее использовать CFD-моделирование, но с учётом выше указанных допущений касательно геометрии.

## Влияние коэффициента $C_x$ на расход топлива

Для определения влияния коэффициента аэродинамического сопротивления на расход топлива транспортного средства проведён сравнительный расчёт:  $C_x = 0,42$  – автомобиль без аэродинамических обвесов,  $C_x = 0,37$  – с аэродинамическими обвесами. Сперва была определена мощность, затрачиваемая на преодоление аэродинамического сопротивления в зависимости от скорости движения автомобиля (рис. 8).

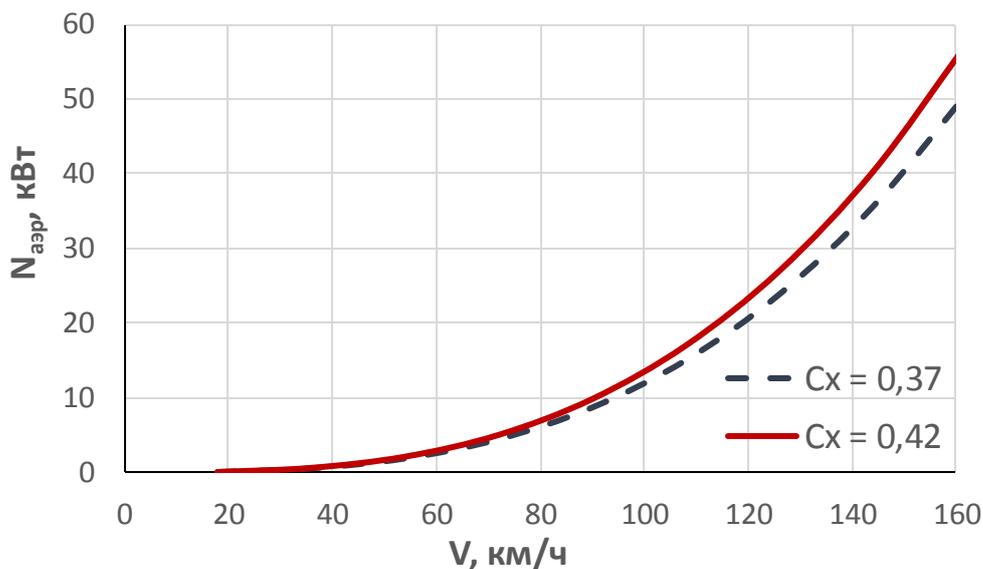


Рис. 8. Мощность, затрачиваемая на преодоление аэродинамического сопротивления

Как видно из графика, влияние коэффициента  $C_x$  проявляется на скоростях более 80 км/ч. При уменьшении коэффициента на 0,05 единиц, мощность аэродинамического сопротивления снижается до 12%.

По значениям мощности двигателя ( $N_d$ ), расходуемой на разных скоростях, а также по вычисленным значениям мощности сопротивления качения ( $N_{тр}$ ) и аэродинамического сопротивления ( $N_{аэр}$ ), была рассчитана условная остаточная мощность ( $N_{ост}$ ) по формуле:

$$N_d - N_{аэр} - N_{тр} = N_{ост} , \quad (3)$$

Используя экспериментальные значения путевого расхода топлива автомобиля на разных скоростях, определяется часовой расход топлива по формуле [9]:

$$G_T = \frac{Q_s \cdot \rho_T \cdot v}{100} \quad (4)$$

где  $Q_s$  – путь расход топлива, л/100 км;  $\rho_T$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>.  
Рассчитаны удельные расходы топлива транспортного средства в целом по формуле:

$$g_{\text{автом}} = \frac{G_T}{N_{\text{ост}}} \cdot 1000 \quad (5)$$

Результаты расчёта представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчётов расходов топлива автомобиля

V, км/ч	Q <sub>s</sub> , л/100 км	G <sub>T</sub> , кг/ч	g <sub>автом</sub> , г/кВт·ч	
			C <sub>x</sub> = 0,37	C <sub>x</sub> = 0,42
54	7,5	3,04	168	170
72	7,0	3,78	148	152
90	8,0	5,40	173	179
108	9,5	7,70	220	234
126	11,0	10,40	288	316
144	13,0	14,04	409	475
162	15,0	18,23	623	814

Из таблицы видно, что при уменьшении коэффициента  $C_x$  на 0,05 единиц, условный удельный расход топлива транспортного средства уменьшается от 4 до 15% на промежутке изменения скорости от 90 до 145 км/ч. А на скорости 160 км/ч и более уменьшается на 23%. Таким образом можно сделать вывод, что на снижение расхода топлива автомобиля можно влиять не только, совершенствуя рабочий процесс, систему питания двигателя и т.д., но необходимо учитывать форму транспортного средства.

## Выводы

1. Проанализированы особенности расчета коэффициента лобового сопротивления автомобиля ( $C_x$ ) Nissan Terrano 3 при моделировании в ПК *FlowVision* и экспериментальным путём.
2. Значение коэффициента  $C_x$  при моделировании составило 0,37, что отличается на 12% от паспортного значения и объясняется неполным соответствием геометрии реальному образцу. Для дальнейшего увеличения точности расчёта требуется уточнение геометрии, а также добавление граничных условий в виде вращения колёс и движения дорожного полотна.
3. Значение коэффициента  $C_x$ , выявленное экспериментальным путем, составило 0,42, что соответствует заявленным значениям, но его определение затруднено вследствие необходимости проведения большого количества экспериментальных заездов с высокой повторяемостью.
4. С уменьшением коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_x$  с 0,42 до 0,37 уровень затрачиваемой мощности на аэродинамическое сопротивление снижается на 12%. При этом удельный расход топлива транспортного средства уменьшается на 4...15% на промежутке изменения скорости от 90 до 145 км/ч.

## Список источников

1. Авторское свидетельство № 1740749 А1 СССР, МПК F02М 43/00. Способ питания дизельного двигателя : № 4786404 : заявл. 23.01.1990 : опубл. 15.06.1992 / В. М. Фомин, В. А. Куцевалов, Э. Ф. Андреев [и др.] ; заявитель УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ ИМ.ПАТРИСА ЛУМУМБЫ. – EDN BQRCUX.
2. Марков, В. А. Системы топливоподачи дизельного двигателя, работающего на смесях дизельного топлива и рапсового масла / В. А. Марков, С. Н. Девянин, А. А. Савастенко // Грузовик. – 2014. – № 6. – С. 10-15. – EDN SSZNYB.
3. Савастенко, Э. А. Разработка методики моделирования рабочего процесса дизеля Д-245 при конвертации его на газ при использовании программного комплекса *FlowVision* / Э. А. Савастенко, А. С. Стряпунин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2023. – № 2(36). – EDN UKMLJZ.

4. Ahmed, S. R. Some Salient Features of the Time -Averaged Ground Vehicle Wake / S. R. Ahmed, G. Ramm and G. Faltin // SAE Transactions. – 1984. – Vol. 93. – No. 2: – P. 473-503. – DOI: 10.4271/840300
5. FlowVision.ru : официальный сайт. – Москва. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://flowvision.ru/ru/support-menu-header-ru/blog-ru/ahmed-body-part1> (дата обращения: 19.02.2024). – Ahmed Body во FlowVision: моделируем вместе. Часть 1.
6. CFD analysis of the flow variation due to addition of aerodynamic devices on underbody of Renault Duster using Fluent - Ansys 14.5 / A. Parab, A. Sakarwala, B. Paste, V. Patil, A. Mangrulkar // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2015. – Vol. 3. – № 01. – P 1-6.
7. Архирейский, А. А. Определение параметров сопротивления движению автомобиля методом выбега : Методические указания / А. А. Архирейский. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2016. – 35 с. – EDN XXFQDT.
8. Петрушов, В.А. Автомобили и автопоезда: Новые технологии исследования сопротивлений качений и воздуха / В.А. Петрушов. – М.: ТОРРУС ПРЕСС, 2008. – 352 с.
9. Петрушов, В.А. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов / В. П. Петрушов, С. А. Шуклин, В. В. Московкин. – М.: Машиностроение, 1975. – 224 с.

### References

1. Fomin V.M., Kutsevalov V.A., Andreenko E.F., Patrahaltsev N.N., Savastenko A.A. Copyright certificate SU 1740749 A1, 06.15.1992.
2. Марков В.А., Девьянин С.Н., Савастенко А.А. *Gruzovik*, 2014, no. 6, pp. 10-15.
3. Savastenko E.A. Stryapunin A.S. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2023, no. 2(36).
4. Ahmed S.R., Ramm G., Faltin G. *SAE Transactions*, 1984, vol. 93, no. 2, pp. 473-503. DOI: 10.4271/840300.
5. URL: <https://flowvision.ru/ru/support-menu-header-ru/blog-ru/ahmed-body-part1> (19.02.2024).
6. Parab A., Sakarwala A., Paste B., Patil V., Mangrulkar A. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2015, vol. 3, no. 01, pp.1-6.
7. Arkhireisky A.A. *Opredeleniye parametrov soprotivleniya dvizheniyu avtomobilya metodom vybega* (Determination of resistance parameters to vehicle movement using the coasting method), Orenburg, Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet, 2016, 35 p.
8. Petrushov V.A. *Avtomobili i avtopoyezda: Novyye tekhnologii issledovaniya soprotivleniy kacheniy i vozdukha* (Automobiles and road trains: New technologies for studying rolling and air resistance). – Moscow, TORRUS PRESS, 2008, 352 p.
9. Petrushov V.A., Shuklin S.A., Moskovkin V.V. *Soprotivleniye kacheniyu avtomobiley i avtopoyezdov* (Rolling resistance of cars and road trains), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 224 p.

Рецензент: Дунин А.Ю., д-р техн. наук, доц., МАДИ

## *Информация об авторах*

**Стряпунин Александр Сергеевич**, аспирант, МАДИ.

**Савастенко Эдуард Андреевич**, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

**Филиппов Владимир Романович**, магистрант, МАДИ.

**Филиппова Евгения Максимовна**, магистрант, МАДИ.

**Хазиев Булат Ильнурович**, магистрант, МАДИ.

## *Information about the authors*

**Stryapunin Alexander S.**, postgraduate, MADI.

**Savastenko Eduard A.**, Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

**Filippov Vladimir R.**, undergraduate, MADI.

**Filippova Evgenia M.**, undergraduate, MADI.

**Khaziev Bulat I.**, undergraduate, MADI.

*Статья поступила в редакцию 18.05.2024; одобрена после рецензирования 21.05.2024; принята к публикации 14.06.2024.*

*The article was submitted 18.05.2023; approved after reviewing 21.05.2024; accepted for publication 14.06.2024.*