

**Мармут І.А.,  
Рабінович Е.Х.**  
Харківський національний  
автомобільно-дорожній університет  
E-mail: mia2005.62@ukr.net

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА  
АЕРОДИНАМІЧНОГО ТА ДОРОЖНЬОГО ОПОРІВ  
РУХУ АВТОМОБІЛЯ**

УДК 629.3.016

*Мармут І.А., Рабінович Е.Х. «Експериментальна оцінка аеродинамічного та дорожнього опорів руху автомобіля»*

*Контроль і діагностування технічного стану автомобілів є однією з найважливіших проблем. Проведені в ХНАДУ численні дослідження, описані в працях проф. М.Я. Говоруценко, доводять, що технічний стан автомобіля найточніше характеризує параметр «витрата палива».*

*На витрату палива впливають багато чинників: експлуатаційні та конструктивні. До останніх можна віднести аеродинамічні властивості автомобіля та стан ходової частини. Постійне вдосконалення автомобілів, шин і мастильних матеріалів змушує повертатися до експериментальної оцінки опорів руху автомобіля, тому дослідження методів і засобів такої оцінки важливі і актуальні.*

*У статті приведені результати експериментальних досліджень аеродинамічного опору та опору кочення коліс автомобіля за вибігом методом дорожніх випробувань.*

*Традиційно опір повітря руху автомобіля вважають пропорційним квадрату швидкості. Але розбіжність розрахункових і експериментальних кривих в області середніх і, особливо, високих швидкостей, де аеродинамічні сили превалюють, змушує глибше вникнути в це питання.*

*Прийнято вважати, що коефіцієнт аеродинамічного опору  $C_x$  – це постійна характеристика даного автомобіля, яка залежить тільки від його конфігурації, положення в просторі (нахил, кліренс) і стану поверхонь. Варіацію опору повітря слід пояснювати непостійністю показника ступеня у формулі для обчислення  $C_x$ . Опубліковані значення  $C_x$  отримують шляхом продувки в аеродинамічних трубах. Як відомо, в трубі опір повітря менше, ніж на дорозі, на 5...10%. Тому для нормування діагностичних параметрів треба знати дійсні значення  $C_x$  для конкретної моделі автомобіля.*

*Дослідження кочення колеса по дорозі виконували багато авторів. Однак всі ці дослідження проводилися на старих діагональних шинах. Зараз же на легкових автомобілях застосовуються тільки радіальні шини, дослідження опору коченню яких по дорозі проводять для полігонних умов. Також при аналізі руху автомобіля, слід розрізняти опір коченню ізольованого колеса і повного автомобіля. Тому повернення до вивчення цього питання для автомобілів, які перебувають в експлуатації є актуальним.*

*Отримані результати експериментів дозволили удосконалити метод оцінки сумарних опорів при русі автомобіля за вибігом з метою поділу цих опорів на складові: дорожній і аеродинамічний опору.*

**Ключові слова:** автомобіль, дорожні випробування, опір коченню коліс, коефіцієнт аеродинамічного опору, вибіг.

*Мармут И.А., Рабинович Э.Х. «Экспериментальная оценка аэродинамического и дорожного сопротивления движению автомобиля»*

*Контроль и диагностирование технического состояния автомобилей является одной из важнейших проблем. Проведенные в ХНАДУ многочисленные исследования, описанные в трудах проф. Я. Говоруценко, доказывают, что техническое состояние автомобиля точно характеризует параметр «расход топлива».*

*На расход топлива влияют многие факторы: эксплуатационные и конструктивные. К последним можно отнести аэродинамические свойства автомобиля и состояние ходовой части. Постоянное совершенствование автомобилей, шин и смазочных материалов заставляет возвращаться к экспериментальной оценке сопротивления движению автомобиля, поэтому исследование методов и средств такой оценки важны и актуальны.*

*В статье приведены результаты экспериментальных исследований аэродинамического сопротивления и сопротивления качению колес автомобиля по выбегу методом дорожных испытаний.*

*Традиционно сопротивление воздуха движению автомобиля считают пропорциональным квадрату скорости. Но расхождение расчетных и экспериментальных кривых в области средних и особенно высоких скоростей, где аэродинамические силы преобладают, заставляет глубже вникнуть в этот вопрос.*

*Принято считать, что коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_x$  – это постоянная характеристика данного автомобиля, которая зависит только от его конфигурации, положения в пространстве (наклон, клиренс) и состояния поверхностей. Вариацию сопротивления воздуха следует объяснять непостоянством показателя степени в формуле для вычисления  $C_x$ . Опубликованные значения  $C_x$  получают путем продувки в аэродинамических трубах. Как известно, в трубе сопротивление воздуха меньше, чем на дороге, на 5...10%. Поэтому для нормирования диагностических параметров надо знать действительные значения  $C_x$  для конкретной модели автомобиля.*

*Исследование качения колеса по дороге выполняли многие авторы. Однако все эти исследования проводились на старых диагональных шинах.*

Сейчас же на легковых автомобилях применяются только радиальные шины, исследования сопротивления качению которых по дороге проводят при полигонных условиях. Также при анализе движения автомобиля, следует различать сопротивление качению изолированного колеса и полного автомобиля. Поэтому возвращение к изучению этого вопроса для автомобилей, находящихся в эксплуатации, является актуальным.

Полученные результаты экспериментов позволили усовершенствовать метод оценки суммарных сопротивлений при движении автомобиля по выбегу с целью разделения этих сопротивлений на составляющие: дорожные и аэродинамические сопротивления.

**Ключевые слова:** автомобиль, дорожные испытания, сопротивление качению колес, коэффициент аэродинамического сопротивления, выбег.

*I. Marmut, E. Rabinovich "Experimental assessment of aerodynamic and road resistance to vehicle movement"*

Monitoring and diagnosing the technical condition of vehicles is one of the most important problems. Numerous studies carried out in KNADU, described in the works of prof. M. Govorushchenko, prove that the technical condition of the car accurately characterizes the parameter "fuel consumption".

Many factors affect fuel consumption: operational and design. The latter include the aerodynamic properties of the vehicle and the state of the chassis. The constant improvement of cars, tires and lubricants forces a return to the experimental assessment of the resistance to movement of a car, therefore, the study of methods and means of such an assessment is important and relevant.

The article presents the results of experimental studies of aerodynamic resistance and rolling resistance of car wheels on coast by road tests.

Traditionally, air resistance to vehicle movement is considered proportional to the square of the speed. But the discrepancy between the calculated and experimental curves in the region of average and especially high speeds, where aerodynamic forces prevail, forces us to delve deeper into this issue.

It is generally accepted that the aerodynamic drag coefficient  $C_x$  is a constant characteristic of a given car, which depends only on its configuration, position in space (inclination, clearance) and the state of surfaces. The variation in air resistance should be explained by the inconsistency of the exponent in the formula for calculating  $C_x$ . The published  $C_x$  value is obtained by blowing in wind tunnels. As you know, the air resistance in the pipe is less than on the road by 5...10%. Therefore, in order to standardize the diagnostic parameters, it is necessary to know the actual values of  $C_x$  for a specific car model.

Many authors have studied wheel rolling on the road. However, all of these studies were conducted on old bias tires. Now, only radial tires are used on passenger cars, the rolling resistance of which on the road is studied under test conditions. Also, when analyzing the movement of a car, one should distinguish between the rolling resistance of an insulated wheel and a complete car. Therefore, returning to the study of this issue for vehicles in service is relevant.

The experimental results obtained made it possible to improve the method for assessing the total resistance when the vehicle is coasting in order to separate these resistances into components: road and aerodynamic resistance.  
**Keywords:** vehicle, road tests, wheel rolling resistance, drag coefficient, coasting.

## Вступ

Як відомо, в процесі експлуатації технічний стан автомобілів погіршується. Контроль і діагностування технічного стану рухомого складу автотранспорту з точки зору безпеки руху є однією з найважливіших проблем. Особливо важливий цей контроль для систем, технічний стан яких впливає на безпеку руху, перш за все, гальмівних систем, а також силового агрегату в режимі тягових випробувань.

Необхідний елемент розумної системи технічної експлуатації автомобілів – діагностика, тобто регулярне отримання інформації про поточний стан об'єкта. Це можна здійснити за допомогою відповідного діагностичного обладнання. На невеликих масових об'єктах, наприклад, легкових автомобілях, техніко-економічні міркування сьогодні обмежують такі можливості (відповідне діагностичне обладнання занадто дороге).

Тут потрібні методи, що дозволяють оцінити стан об'єкта за його робочими (вихідними) параметрами. Для автомобілів в якості таких параметрів можна використовувати значення часу розгону або вибігу на дорозі.

Постійне вдосконалення автомобілів, шин і мастильних матеріалів змушує повертатися до експериментальної оцінки опорів руху автомобіля, тому дослідження методів і засобів такої оцінки важливі і актуальні. Прийнято вважати, що найбільш точні такі вимірювання на лабораторних установках – роликівих стендах, в аеродинамічних трубах, але останнє слово завжди залишається за дорожніми випробуваннями.

Суму опорів оцінюють множенням вимірних сповільнень вибігу  $j$  на приведену масу автомобіля  $\delta \cdot m$ , де  $\delta$  – коефіцієнт, який враховує обертові маси. Складніше розділити сумарні опори на складові і отримати коефіцієнти аеродинамічного опору повітря  $C_x$  і опору коченню  $f$ .

### Аналіз останніх досліджень

Методи оцінки аеродинамічного опору автомобіля викладені в [1 – 2]. Характеристика опору коченню автомобільних шин для легкових автомобілів наведені в [3 – 4]. Викладені методи вимагають дорогого експериментального обладнання, такого як аеродинамічні труби і роликіві стенди.

Методи оцінки опорів руху по вибігу автомобіля розглянуті в [5]. Зупинимося на деяких з них, що реалізуються без спеціального обладнання силами користувача. У [6] описаний такий метод: «автомобіль масою  $m$  з лобовою площею  $F$  рухається накатом на нейтральній передачі в умовах затишності по рівній дорозі. Для швидкостей руху  $V_1$  і  $V_2$  ( $V_1 > V_2$ ) заміряють сповільнення  $j_1$  і  $j_2$ » і розраховують значення коефіцієнтів аеродинамічного опору  $C_x$  і опору коченню  $\psi$  за формулами

$$C_x = \frac{6m \cdot (j_1 - j_2)}{F \cdot (V_1^2 - V_2^2)}; \quad \psi = \frac{28,3 \cdot (j_2 \cdot V_1^2 - j_1 \cdot V_2^2)}{(V_1^2 - V_2^2) \cdot 10^3}. \quad (1)$$

Метод рекомендований для швидкостей до 100 км/год, коли опір коченню пропонується вважати постійним. В роботі [7] запропоновано проводити виміри і на швидкостях вище 100 км/год, а в модель ввести коефіцієнт  $K_V$  – очікуване збільшення коефіцієнта опору коченню при переході від меншої швидкості до більшої:

$$K_V = \frac{A \cdot V_1^2 - B \cdot V_1 + C}{A \cdot V_2^2 - B \cdot V_2 + C}, \quad (2)$$

де  $A, B, C$  – коефіцієнти апроксимації гіпотетичних залежностей коефіцієнта опору коченню від швидкості для різних типів шин (табл. 1).

Крім того, в модель введена фактична густина повітря  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), а швидкості виражені в системній одиниці – м/с. Розрахункові формули при цьому прийняли вигляд:

$$C_x = \frac{2 \cdot \beta \cdot m \cdot (j_1 - j_2 \cdot K_V)}{F \cdot \rho \cdot (V_1^2 - V_2^2 \cdot K_V)}; \quad \psi = \frac{\beta \cdot (j_2 \cdot V_1^2 - j_1 \cdot V_2^2)}{g \cdot (V_1^2 - V_2^2 \cdot K_V)}, \quad (3)$$

Реальні значення коефіцієнтів  $C_x$  та  $\psi$  розрахунок дає при  $V_1 = 113...123$  км/год (31...34 м/с),  $V_2 = 27...49$  км/год (7...14 м/с).

Будемо називати цей метод «вибігом з двох швидкостей» (В2Ш). Його переваги: нескладна реалізація, універсальність, прийнятна точність. Недоліки: необхідність вимірів уклону дороги, швидкості і напрямку вітру з точною синхронізацією цих вимірювань з рухом автомобіля; неоднозначність результату (розрахунок дає масив можливих значень аеродинамічного опору  $C_x$  і опору коченню  $\psi$  в залежності від обраного показника «місце»); чутливість до вибору пари швидкостей  $V_1$  і  $V_2$ .

Часто тести проводять на негоризонтальній дорозі. Це створює додаткові складності – треба отримати значення уклонів в конкретних місцях на дорозі. Але метод дає і нові можливості.

При вільному скачуванні автомобіля з уклону  $i$  швидкість до кінця процесу стабілізується: наприклад, поблизу  $V=30...35$  км/год. Сила скочення  $P_i = mgi$  врівноважується опором повітря  $kF(V \pm W)^E$  (швидкості автомобіля  $V$  і вітру  $W$  – в м/с), опором коченню  $mgf$  і втратами холостого ходу трансмісії  $P_{xx}$ :

$$mgi - mgf - P_{xx} - kF(V \pm W)^E - ma = 0; \quad kF = \frac{mg(i - f) - P_{xx} - ma}{(V \pm W)^E}$$

або

$$f = i - \frac{P_{xx} + kF(V \pm W)^E + ma}{mg}. \quad (4)$$

Таблиця 1

**Коефіцієнти гіпотетичних рівнянь залежності коефіцієнта опору коченню від швидкості для різних шин з урахуванням місця в полі можливих значень коефіцієнта опору коченню**

Шини	Місце	A	B	C	Примітка
HV	нижн.	1,24762E-07	-3,07143E-06	1,25095E-02	Верхнє і нижнє рівняння отримані апроксимацією кривих, що огинають поле можливих значень $f(V)$ по [6], інші – пропорційним розподілом висоти полів (при допущенні, що окремі криві залежностей йдуть всередині поля не хаотично, а правильним віялом).
	0,2	1,13333E-07	5,85714E-07	1,28095E-02	
	0,4	1,01905E-07	4,24286E-06	1,31095E-02	
	середн.	9,61905E-08	6,05714E-06	1,32613E-02	
	0,6	9,04762E-08	7,90000E-06	1,34095E-02	
	0,8	7,90476E-08	1,15571E-05	1,37095E-02	
	верхн.	6,76190E-08	1,52143E-05	1,40095E-02	
ST	нижн.	1,40190E-07	-4,40000E-06	1,13338E-02	
	0,2	1,74400E-07	-6,02857E-06	1,17871E-02	
	0,4	2,08610E-07	-7,65714E-06	1,22405E-02	
	середн.	2,25714E-07	-8,47143E-06	1,24671E-02	
	0,6	2,42819E-07	-9,28571E-06	1,26938E-02	
	0,8	2,77029E-07	-1,09143E-05	1,31471E-02	
	верхн.	3,11238E-07	-1,25429E-05	1,36005E-02	
ECO	нижн.	1,55429E-07	-1,05143E-05	8,56857E-03	
	0,2	1,51467E-07	-9,92000E-06	9,35162E-03	
	0,4	1,47505E-07	-9,32571E-06	1,01347E-02	
	середн.	1,45524E-07	-9,02857E-06	1,05262E-02	
	0,6	1,43543E-07	-8,73143E-06	1,09177E-02	
	0,8	1,39581E-07	-8,13714E-06	1,17008E-02	
	верхн.	1,35619E-07	-7,54286E-06	1,24838E-02	

Силу інерції  $ma$  можна виключити, якщо прискорення  $a \cong 0$ . Знак плюс у дужках відноситься до випадку зустрічного вітру, мінус – попутного. Обчислити  $kF$  і  $f$  незалежно один від одного неможливо. Але, якщо відомий фактор обтічності  $kF$  і швидкість вітру  $W$ , можна обчислити уклон дороги  $i$ :

$$i = f + \frac{P_{xx} + kF(V \pm W)^E + ma}{mg}. \quad (5)$$

Зазвичай даних про уклон немає. Один з негеодезичних методів його визначення запропонований у [8]. Він заснований на підборі таких точок (точок однакових швидкостей (ТОШ)) на вимірній ділянці дороги, які автомобіль проходить з однаковою за модулем швидкістю при русі по уклону накатом вгору і вниз.

Формулювання мети дослідження

Метою виконаної роботи є вдосконалення методів оцінки сумарних опорів при русі автомобіля за вибігом з метою поділу цих опорів на складові: дорожній і аеродинамічний опори. Для досягнення поставленої мети були проведені дорожні випробування автомобілів ВАЗ-2115 і ZAZ Lanos і розраховані значення дорожніх і аеродинамічних опорів для цих автомобілів.

При дослідженні виходимо з того, що запропонований метод досліджень повинний забезпечувати: об'єктивність оцінки параметрів, які заміряються; стабільність вимірів; простоту і доступність для обслуговуючого персоналу; необхідну точність вимірів.

Результати досліджень

1. Дорожні випробування автомобіля ВАЗ-2115.

Для зіставлення описаних методів розподілу опорів взяті дані тесту автомобіля ВАЗ-2115: лобова площа –  $F = 1,874 \text{ м}^2$ ; маса з випробувачами – 1460 кг. Шини Matador Stella 2 (175/70R13 82T M16), приведена маса чотирьох коліс і веденої частини трансмісії – 33 кг. Вантажопідйомність шини при тиску 1,9 bar – 380 кг. Коефіцієнт використання вантажопідйомності шин по [9]:  $1,3 - 0,3 \cdot 4 \cdot 380/1460 = 0,965$ . Густина повітря  $\rho = 1,19 \text{ кг/м}^3$ . Напрямок вітру – від «Півночі» до «Сходу», тобто від 0 до 90°. Швидкість вітру на рівні 0,8...0,9 м за виміром анемометром –  $W = 2,4 \text{ м/с}$ . При середньому куті 45°:  $V_w = 2,4 \cdot 0,7 = 1,7 \text{ м/с}$ .

Результати розрахунків (табл. 2) залежать від точності вимірювань, від вибору швидкостей  $V_1$  і  $V_2$ , значень уклону, швидкості вітру, втратами холостого ходу трансмісії  $P_{xx}$  і очікуваного збільшення коефіцієнта опору коченню  $K_V$  – тобто, від досвіду та інтуїції дослідника.

Таблиця 2

Розрахунок коефіцієнтів опору руху автомобіля ВАЗ-2115 методом вибігу з двох швидкостей (В2Ш)

Густина повітря $\rho$	1,19	1,19	1,19
$V_{1\text{сер}}, \text{ км/год}$	119,2	103,43	89,16
$j_1 \text{ м/с}^2$	0,7278	0,5787	0,5365
$E_1$	1,9812	1,9900	2,0108
Широта 1 мінус 49,9°	0,05306	0,05143	0,05002
Уклон $gr_1$	0,0177	0,0186	0,0205
$ig=9,81*gr/\beta$	0,1698	0,1784	0,1967
$W_1, \text{ м/с}$	1,7	1,7	1,7
$j_w$	-0,01857	-0,00744	0,00542
$j_{xx}$	0,04111	0,03537	0,03307
$j_1-j-j$	0,5355	0,3723	0,3013
$V_{2\text{сер}}, \text{ км/год}$	27	27	27
$j_2 \text{ м/с}^2$	0,3388	0,3441	0,3475
$E_2$	2,13	2,13	2,13
Широта 2 мінус 49,9°	0,04969	0,04969	0,04969
Уклон $gr_2$	0,0201	0,0201	0,0201
$ig=9,81*gr/\beta$	0,1928	0,1928	0,1928
$W_2, \text{ м/с}$	1,7	1,7	1,7
$j_w$	-0,0081	-0,0081	-0,0081
$j_{xx}$	0,0411	0,0387	0,0362
$j_2-j-j$	0,1129	0,1207	0,1266
$K_V$ нижн./верх.	1,1340/1,091500	1,0888/1,0626	1,0558/1,0412
$K_V$ середн.	1,108698	1,07322	1,04712
$C_x$ нижн./верх.	0,6088/0,6134	0,4650/0,4695	0,4062/0,4098
$C_x$ середн.	<b>0,61154</b>	<b>0,46770</b>	<b>0,40834</b>
$f$ нижн./верх.	0,00768/0,00765	0,00945/0,00942	0,01046/0,01044
$f$ середн.	<b>0,007663</b>	<b>0,009433</b>	<b>0,010449</b>

**Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів**  
**Technical service of agriculture, forestry and transport №23' 2021**

Продування в аеродинамічній трубі НИЦІАМТ дала  $C_x = 0,429$  [10]. Ближче інших до цього значення результати, отримані для пари швидкостей 103 і 27 км/год:  $C_x$  від 0,4650 до 0,4695 із середнім значенням 0,4677. Це вище опублікованого на 8,4...9,4%, що вкладається в звичайний діапазон 3...13% [11].

Метод стабілізації перевірявся за трьома скочуванням того ж автомобіля на тій же дорозі (табл. 3).

Таблиця 3

Дані ділянок стабілізації швидкості скочування

Час виміру	Широта – 49,9	Уклон (мін.-сер.-макс.)	Швидкість середня, км/год	Сповільнення середнє, м/с <sup>2</sup>
37:55 – 38:12	0,06020 – 0,06172	0,01322 – <b>0,01923</b> – 0,02678	37,137	-0,00102
44:46 – 45:06	0,05744 – 0,05926	0,01300 – <b>0,01309</b> – 0,01316	37,735	-0,00104
08:30 – 08:35	0,06062 – 0,06107	0,01216 – <b>0,01436</b> – 0,01444	37,230	-0,0035
Середні значення		<b>0,01577</b>	<b>37,367</b>	<b>-0,00185</b>

Для розрахунків було прийнято опубліковане значення  $C_x = 0,429$ . Коефіцієнт опору коченню при цьому склав 0,00816.

Якщо залежність розрахункового уклону дороги від  $kF$  і  $W$  помірна, можна вирішити завдання без даних про уклон: прийняти попередні значення  $kF$  і  $f$  за літературними даними, а  $W$  – за даними метеостанцій (ввівши поправки на висоту і напрям вітру щодо дороги), обчислити уклон дороги, а потім і коефіцієнт опору коченню або  $kF$ .

У табл. 4 представлені розрахункові значення уклону дороги при різних поєднаннях  $kF$  і  $W$ . Межі діапазону факторів обрані нами максимально широкі для цього автомобіля, шин і дороги ( $f = 0,00816$  для всіх варіантів).

Таблиця 4

Розрахункові значення уклону дороги (промиле) при різних  $kF$  і  $W$

$C_x$	$kF$	Швидкість вітру $W$ (вздовж дороги на рівні 0,8...0,9 м), м/с									Середні $m, \%$	СКВ $\sigma, \%$
		0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3		
0,37	0,4447	14,53	14,67	14,81	14,96	15,10	15,25	15,40	15,56	15,71	15,111	0,40
0,39	0,4688	14,74	14,89	15,03	15,19	15,34	15,50	15,66	15,82	15,98	15,349	0,43
0,41	0,4928	14,94	15,10	15,26	15,41	15,58	15,74	15,91	16,08	16,25	15,586	0,45
0,43	0,5168	15,15	15,31	15,48	15,64	15,81	15,99	16,16	16,34	16,52	15,823	0,47
0,45	0,5409	15,36	15,53	15,70	15,87	16,05	16,23	16,42	16,60	16,79	16,061	0,49
0,47	0,5649	15,56	15,74	15,92	16,10	16,29	16,48	16,67	16,86	17,06	16,298	0,51
0,49	0,5890	15,77	15,95	16,14	16,33	16,52	16,72	16,92	17,13	17,33	16,535	0,54
								$\sigma$	0,51	$m$	<b>15,823</b>	

На жаль, навіть якщо обмежити діапазон мінімальними відхиленнями від середнього значення ( $15,99 \pm 0,4 \%$ ), розрахунок дає значення  $C_x$  від 0,41 до 0,48, що занадто грубо.

Метод точок однакових швидкостей (ТОШ). Точки однакових швидкостей знаходилися на перетині кривих скочування по уклону і вибігу в зворотному напрямку мінус 49,9° (рис.1). Числа в назвах кривих – час в секундах від початку запису треку (стовпець А в треку), точки – поєднання імен вибігу і скочування (наприклад, 478\_702).

Скорочення «БА» – за барометричним альтиметром. Дані вибраних для прикладу точок наведені у табл. 5.

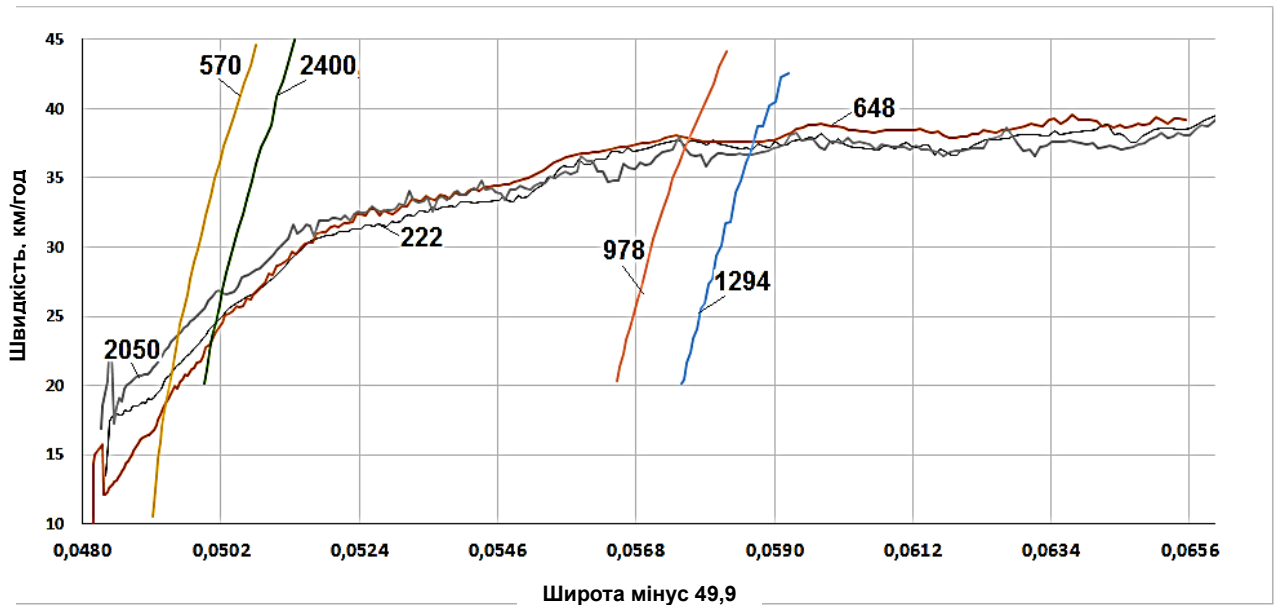


Рис. 1. Пошук точок однакових швидкостей в тестах автомобіля ВАЗ-2115

Таблиця 5

Приклади точок однакових швидкостей

Точка	$j$ вибігу	$j$ скоч.	$V$ , км/год	Широта -49,9	Уклон БА	Уклон ТОШ	$f$ ТОШ	$C_x$ БА / $W$ , м/с
570_2050	-0,2893	0,0716	24,02	0,049593	0,02025	0,01968	0,007589	0,429/2,88
978_222	-0,2602	-0,0008	37,58	0,057615	0,01613	0,01484	0,006866	0,445/3,30
1294_2050	-0,2874	-0,0042	37,22	0,058635	0,01657	0,01791	0,010554	0,429/1,78

Складемо систему рівнянь, де перше рівняння описує рух автомобіля вниз по уклону (індекс  $dn$ , від англ. down), друге – вгору (індекс  $up$ ):

$$\begin{cases} m_{dn}gi - kF(V \pm w_{dn})^2 - P_{xx} - m_{dn}gf - \delta m_{dn}j_{dn} = 0; \\ -m_{up}gi - kF(V \mp w_{up})^2 - P_{xx} - m_{up}gf - \delta m_{up}j_{up} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

де "+" в подвійних знаках означає зустрічний вітер, "-" – попутний.

За час, що розділяє процеси вибігу та скочування, могли змінитися швидкість вітру і маса автомобіля.

Введемо коефіцієнт співвідношення мас в двох режимах:  $K_m = m_{dn} / m_{up}$ ;  $m_{up} \cdot K_m = m_{dn}$ . Помножимо друге рівняння на  $K_m$  і віднімемо його з першого: При цьому зникнуть деякі члени, що дасть можливість знайти шуканий фактор обтічності  $kF$ . Потім, підставивши його в будь-яке вихідне рівняння можна знайти  $f$ :

$$2m_{dn}gi - kF \cdot \left[ (V \pm w_{dn})^2 - K_m (V \mp w_{up})^2 \right] - P_{xx}(1 - K_m) - \delta m_{dn}(j_{dn} - j_{up}) = 0;$$

$$kF = \frac{2mgi - \delta m(j_{dn} - j_{up})}{\pm 4Vw}; f = \frac{m_{dn}gi - kF(V \pm w_{dn})^2 - P_{xx} - \delta m_{dn}j_{dn}}{m_{dn}g}. \quad (7)$$

Але ці формули не приносять користі, якщо немає даних про поздовжній профіль, тобто значень уклону в потрібних точках.

Результати розрахунку сильно залежать від уклону і швидкості вітру (стовпець  $C_x$  БА /  $W$ ).

І навпаки, розрахункові ухили мало залежать від  $C_x$  і  $W$  (табл. 4) і досить близькі до вимірних БА (розбіжність менше 1,5 ‰). Це дає можливість навіть при відсутності інформації обчислити значення ухилу та використовувати їх в подальших розрахунках.

Всі значення показників по ТОШ в табл. 5 розраховані при  $C_x = 0,429$  і  $W = 1,7$  м/с. Середнє значення  $f$  по табл. 5 становить 0,00834, що досить близько до 0,00816 за методом стабілізації (2,2%).

Отже, експерименти показали доступність розглянутих методів для реалізації і дозволили оцінити передбачувану точність. Застосуємо ці методи для визначення показників тестового екземпляра ZAZ Lanos.

### 2. Дорожні випробування автомобіля ZAZ Lanos.

Показники ZAZ Lanos:  $F = 2,07$  м<sup>2</sup> (визначена фотоспособом з корекцією перспективних спотворень),  $C_x = 0,33...0,405$  (різні джерела). Маса 1410 кг. Шини TOYO PROXES T1R 195/50 R15 82V, опір коченню по категорії  $F$  ( $f = 0,0106...0,012$ ). Коефіцієнт  $\beta = 1,02591$ . Вантажопідйомність передньої шини при тиску 2,2 бар – 430 кг, задньої при тиску 2,1 бар – 415 кг. Середній коефіцієнт використання вантажопідйомності шин:  $1,3-0,3 \cdot 2 \cdot (430 + 415) / 1410 = 0,94$ .

Густина повітря 1,2354 кг/м<sup>3</sup>. Напрямок вітру – від «Півночі» до «Сходу», тобто в середньому 45°. Швидкість вітру на рівні 0,8...0,9 м за виміром чашковим анемометром – 2,04...2,26 м/с. При середньому азимуті дороги близько 200° можна прийняти середню швидкість вітру  $W = 1,968$  м/с. Результати розрахунків коефіцієнтів опору руху для автомобіля ZAZ Lanos наведені у табл. 6.

Таблиця 6

**Розрахунок коефіцієнтів опору руху автомобіля ZAZ Lanos методом вибігу з двох швидкостей (В2Ш)**

$V_{1\text{сеп}}$ , км/ГОД	103,8	103,8	103,8
$j_1$ m/s <sup>2</sup>	0,5472	0,54717	0,54717
$E_1$	1,98961	1,98961	1,98961
$j_{gr=9,81*i/\beta}$	0,1562	0,1562	0,1562
$j_w$	-0,0465	-0,0465	-0,0465
$j_{xx}$	0,0571	0,0571	0,0571
$j_1-j_j$	0,3803	0,3803	0,3803
$V_{2\text{сеп}}$ , км/ГОД	27	30,7	33,2
$j_2$ m/s <sup>2</sup>	0,3397	0,3441	0,3475
$E_2$	2,1579	2,21289	2,22191
$j_{gr=9,81*i/\beta}$	0,1940	0,1948	0,1850
$j_w$	-0,0129	-0,0176	-0,0200
$j_{xx}$	0,0211	0,0229	0,0241
$j_2-j_j$	0,1375	0,1440	0,1584
$K_V$ нижн./верх.	1,08977 / 1,06326	1,09051 / 1,06317	1,0907 / 1,06293
$K_V$ середн.	1,07397	1,07421	1,07414
$C_x$ нижн./верх.	0,3746 / 0,3792	0,3982 / 0,4026	0,3936 / 0,3985
$C_x$ середн.	0,3773	0,4008	0,3965
$f$ нижн./верх.	0,01108 / 0,01104	0,00947 / 0,00940	0,00978 / 0,00970
$f$ середн.	0,01105	0,00943	0,00973

Середнє значення аеродинамічного опору  $C_x = 0,39156 \approx 0,392$  близько до значення  $C_x = 0,4$ , отриманого нами на горизонтальній дорозі, і до значення 0,375 (за неофіційними даними АвтоЗАЗ). Середній коефіцієнт опору коченню, скоригований на повне завантаження шин  $0,010069 / 0,94 = 0,010712$ , лежить в полі категорії  $F$  (0,0106...0,012).



Метод стабілізації перевірений по чотирьох ділянках (два з них див. на рис. 2). Через малу точність експериментальних даних рішення в загальному вигляді давало неприйнятні результати ( $f = 0,0146, 0,0125, 0,0221, 0,0505$ ;  $kF = -0,041, 0,623, -0,839, 2,611$ ).

Для числового рішення середнє значення  $f$  з ряду  $W = 1,968$  м/с і  $C_x = 0,31...0,41$ , підставляли в рівняння і розраховували  $C_x$ . Результат вважався задовільним, якщо значення  $C_x$  знаходилося в межах  $0,33...0,41$  (граничні опубліковані значення при продувці у аеродинамічній трубі), а значення  $f$ , приведене до повного завантаження – в межах  $0,0106...0,012$  (категорія  $F$ ). Прийнято варіант швидкості стабілізації  $26,39$  км/год: при розрахункових  $f = 0,01113...0,01199$  отримане значення  $C_x = 0,36$  (з  $E = 2$  отримано  $C_x = 0,36$  при  $f = 0,0123$ ).

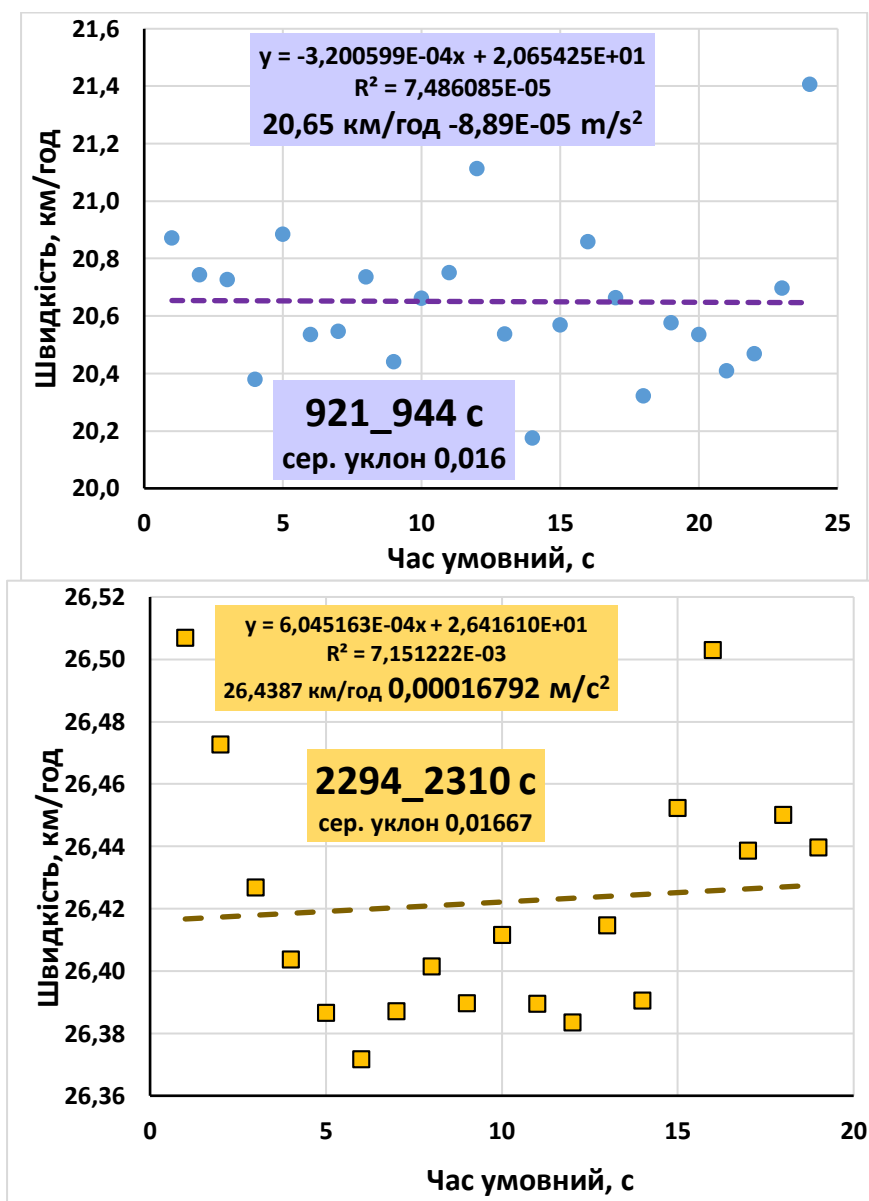


Рис. 2. Приклади ділянок, де швидкість скочування близька до стабільної в тестах автомобіля ZAZ Lanos

Метод ТОШ. Точки в тестах автомобіля ZAZ Lanos (рис. 3) вибирали і позначали за аналогією, як і для автомобіля ВАЗ-2115.

За всіма точками перетину обчислені значення широти, швидкості і прискорень. За цими даними розраховані значення уклонів – рис. 4.

У деяких ТОШ отримані розрахунком значення уклонів практично збігаються зі значеннями, обчисленими за показаннями барометричного альтиметра (БА) навігатора

Garmin: вони відзначені трикутними маркерами, інші – круглими. Цей збіг розглядався як критерій адекватності моделей, якості вимірів і точності розрахунків.

Значення  $kF$  в п'яти точках, які збігаються з БА варіювали від 0,353 до 0,732 із середнім значенням 0,4918. Відповідні значення  $C_x$ , наведені до рівня продувок в аеродинамічній трубі коефіцієнтом 1,075 – від 0,254 до 0,526 із середнім значенням 0,3536. Середнє значення  $f$ , наведене до швидкості 25,6 км/год, склало 0,01251. При відсутності даних про поздовжній профіль розрахунок за всіма точками дав би середнє значення  $C_x = 0,334$ .

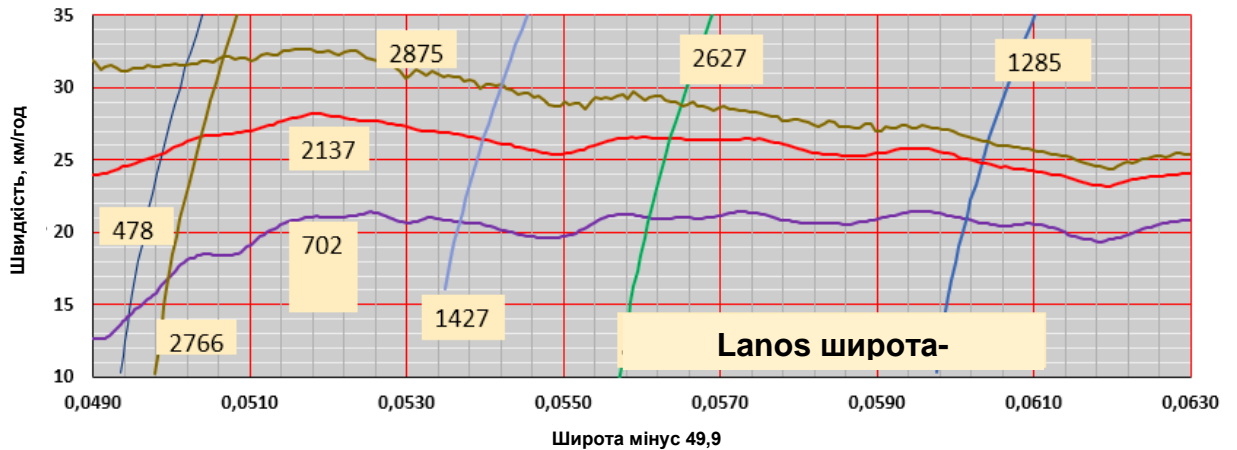


Рис. 3. Пошук точок однакових швидкостей в тестах ZAZ Lanos

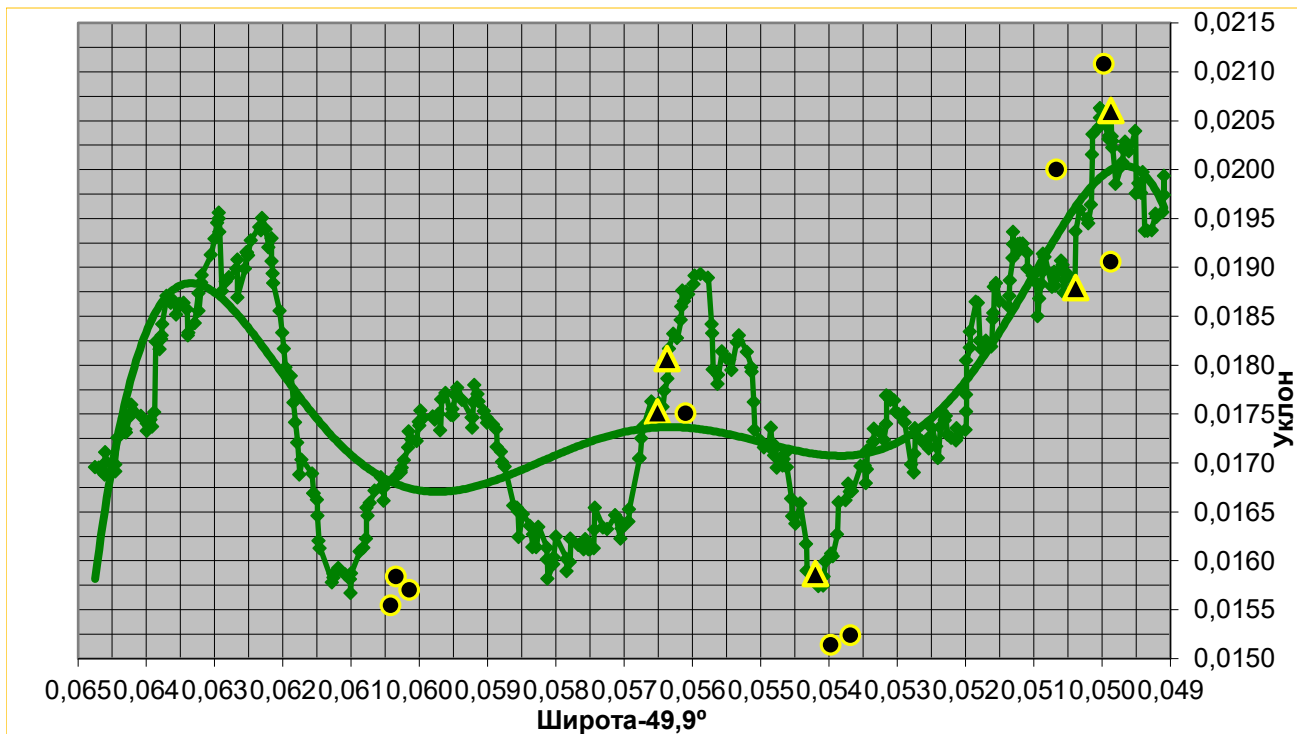


Рис. 4. Ухили на вимірюваній ділянці дороги, які обчислені за вимірюваннями висоти барометричним альтиметром (лінія з точками) і за методом ТОШ

## Висновки

1. Випробування за вибігом автомобілів підтвердили можливість реалізації силами користувача описаних методів визначення опорів руху і поділу їх на складові з прийнятною точністю. Для ZAZ Lanos отримані трьома методами значення  $C_x$  від 0,35 до 0,39.

2. Найбільш привабливий метод точок однакових швидкостей (ТОШ), який дозволяє найдоступнішими засобами отримати значення уклонів в окремих точках за вибігом і скочуванням автомобіля, а далі визначити значення  $C_x$  і  $f$ .

3. Корисним є продовження дослідження методу ТОШ за рахунок збільшення числа точок, використання автомобілів різних моделей (бажано з відомими значеннями лобової площі і  $C_x$ ).

## Список використаних джерел

1. Aerodynamics of Road Vehicles. Thomas Schuetz. SAE International, 2016. –1289 P.
2. Modifying the Aerodynamics of Your Road Car. Julian Edgar, Richard H. Barnard. Veloce Publishing, 2019. – 248 p.
3. Characterization of the Rolling Resistance of Aftermarket Passenger Car Tires – Scholar’s Choice Edition. U S Environmental Protection Agency. Creative Media Partners, LLC, 2015, ISBN: 1297045653, 9781297045653.– 64 p.
4. NHTSA Tire Fuel Efficiency Consumer Information Program Development: Phase 2 – Effects of Tire Rolling Resistance Levels on Traction, Treadwear, and Vehicle Fuel Economy. Larry R. Evans, James D. MacIsaac Jr., John R. Harris and other. National Highway Traffic Safety Administration, Vehicle Research and Test Center, 2009. – 153 p.
5. Дорожное диагностирование легковых автомобилей / [Рабинович Э.Х., Волков В.П., Белогуров Е.А. и др.]; под ред. Э.Х. Рабиновича. – Х.: Изд-во ХНАДУ, 2018. – 279 с.
6. BOSCH. Автомобильный справочник: Пер. с англ. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: ООО «За рулем», 2012. – 1280 с.
7. Рабинович Э.Х. Определение сопротивления движению автомобиля методом однократного выбега / Рабинович Э.Х., Кемалов З.Э., Сосновый А.В. // Автомобильный транспорт: Сб. науч. трудов. – Х.: ХНАДУ, 2008. – Вып. 22. – С. 46-48.
8. Оценка уклона дороги методом скатывания автомобиля / Эрнест Рабинович, Михаил Буравцев, Владимир Зуев, Константин Здебский // Сб. ЕКОВАРНА, 2018. – С. 148-155.
9. Automotive Chassis Engineering. David C Barton, John D Fieldhouse. Springer, 2018. – ISBN: 3319724371, 9783319724379, – 327 p.
10. Сравнение аэродинамики VA3-2115 и VA3-21099 ... – Авторевию №22. 2000. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://autoreview.ru/articles/.../22-2000-sravnenie-aerodinamiki-vaz-2115-i-vaz-210>.
11. Петрушов В.А. Автомобили и автопоезда: Новые технологии исследования сопротивления качению и воздуха. – М.: Торус Пресс, 2008. – 352 с.

## References

1. Aerodynamics of Road Vehicles. Thomas Schuetz. SAE International, 2016. –1289 p.
2. Modifying the Aerodynamics of Your Road Car. Julian Edgar, Richard H. Barnard. Veloce Publishing, 2019. –248 p.
3. Characterization of the Rolling Resistance of Aftermarket Passenger Car Tires – Scholar’s Choice Edition. U S Environmental Protection Agency. Creative Media Partners, LLC, 2015. – 64 p.
4. NHTSA Tire Fuel Efficiency Consumer Information Program Development: Phase 2 - Effects of Tire Rolling Resistance Levels on Traction, Treadwear, and Vehicle Fuel Economy. Larry R. Evans, James D. MacIsaac Jr., John R. Harris and other. National Highway Traffic Safety

Administration, Vehicle Research and Test Center, 2009.– 153 p.

5. Road diagnostics of cars / [Rabinovich E.Kh., Volkov V.P., Belogurov E.A. and etc.]; ed. E.H. Rabinovich. – Kh.: Publishing house of KhNADU, 2018. – 279 p.

6. BOSCH. Automobile directory: Per. from English – 3rd ed. revised and add. – М.: "За рулем", 2012. – 1280 p.

7. Rabinovich E.Kh. Determination of resistance to movement of the vehicle by the single run-out method / Rabinovich E.Kh., Kemalov Z.E., Sosnovy A.V. // Automobile transport: Sat. scientific works. – Kh.: KhNADU, 2008. – V. 22. – S. 46-48.

8. Assessment of the road slope by the method of rolling the car / Ernest Rabinovich, Mikhail Buravtsev, Vladimir Zuev, Konstantin Zdebsky / Sat. EKOVARNA, 2018. – S. 148-155.

9. Automotive Chassis Engineering. David C Barton, John D Fieldhouse. Springer, 2018. – 327 P.

10. Comparison of the aerodynamics of VAZ-2115 and VAZ-21099 ... – Autoreview No. 22. 2000. [Electronic resource]. – Access mode: <https://autoreview.ru/articles/.../22-2000-sravnenie-aerodinamiki-vaz-2115-i-vaz-210>.

11. Petrushov V.A. Cars and road trains: New technologies for studying rolling resistance and air. – М.: Torus Press, 2008. – 352 p.