

Лекція 3. РОЗВИТОК ТЕОРІЇ РУХУ АВТОМОБІЛЯ

Теорія руху автомобіля - наріжний камінь всієї автомобільної науки. Вона базується на рівнянні тягового балансу, що традиційно представляють у наступному виді (для визначеності при описі відомих формул і величин використані позначення, прийняті в [1]):

$$P_k = P_f + P_W + P_a + P_j, \quad (1)$$

де P_f - сила опору коченню коліс, P_W - сила опору повітря, P_a - сила опору підйому, P_j - сила інерції автомобіля.

Останню записують у вигляді

$$P_j = \frac{\delta G_a j_a}{g}, \quad (2)$$

звідки після очевидних перетворень одержують диференціальне рівняння несталоного руху автомобіля:

$$j_a = \frac{dv}{dt} = \frac{P_k - \Sigma P_c}{m_a \cdot \delta} \quad (3)$$

де j_a - прискорення автомобіля, м/с², ΣP_c - сума статичних опорів, H (тобто опорів при постійній швидкості; $\Sigma P_c = P_f + P_W + P_a$), m_a - маса автомобіля в розрахунковому випадку, кг, δ - коефіцієнт урахування обертових мас.

Якщо розглядається рух по інерції (накат, вибіг), то в рівнянні (3) буде відсутній P_k , а до статичних опорів додасться опір холостого ходу трансмісії $P_{хх}$.

Повну окружну силу (силу тяги) визначають [1] з ефективного крутного моменту двигуна $M_{кр}$

$$P_k = \frac{M_{кр} \cdot i_k \cdot i_0 \cdot \eta_m}{r_k}, \quad (4)$$

где i_k – передаточне число коробки передач, i_0 – передаточне число головної передачі, η_m – ККД трансмісії, r_k – радіус кочення колеса (вірніше тут використати динамічний радіус r_d).

Ефективний крутний момент M_e знаходять по зовнішній швидкісній характеристиці двигуна (ХШХД), знятій в усталених режимах. При її відсутності прибігають до розрахункових формул, що дають наближений опис залежностей, найчастіше - до формули С.Р. Лейдермана [2]:

$$M_e = M_N \left[a + b \frac{n}{n_N} - c \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 \right], \quad (5)$$

де $M_N = 9549,3 \frac{N_{e \max}}{n_N}$ - крутний момент при максимальній (номінальній)

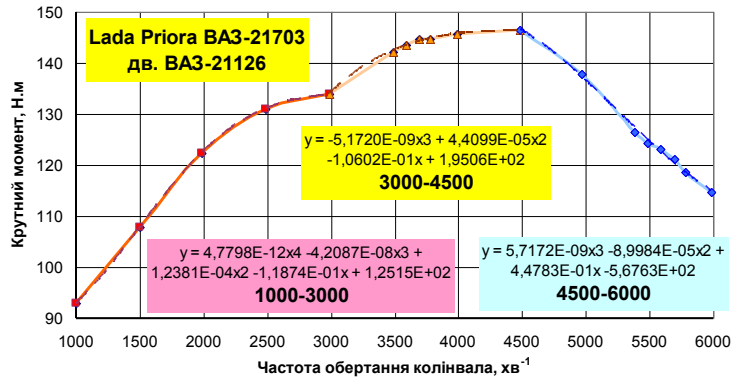
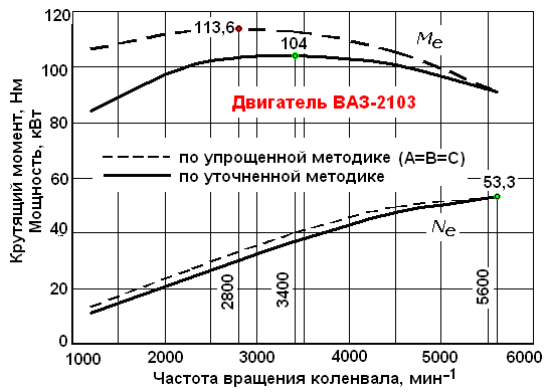
потужності $N_{e \max}$; n_N - частота обертання колєвала при максимальній потужності; n - поточна частота обертання колєвала.

Коефіцієнти a , b , c можна обчислити через коефіцієнти пристосовності двигуна за моментом k_m і за частотою обертання k_ω :

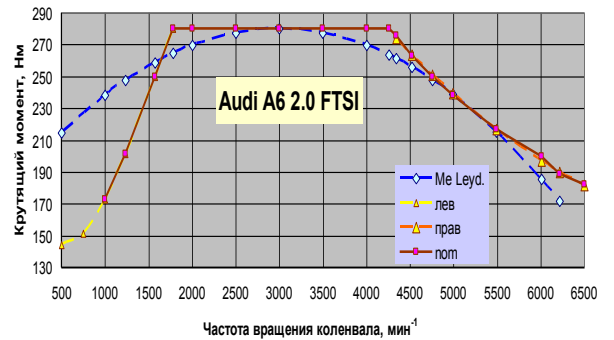
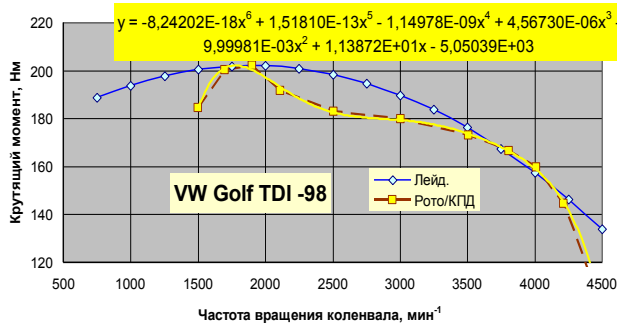
$$k_m = \frac{M_{e \max}}{M_N} \cdot k_\omega = \frac{n_N}{n_M}, \quad b = \frac{2k_m - 1}{1 - k_\omega}, \quad c = \frac{b \cdot k_\omega}{2}; \quad a = 1 - b + c. \quad (6)$$

Нерідко методичні посібники рекомендують спрощений варіант - однакові значення коефіцієнтів для різних двигунів: $a=b=c=1$ для бензинових, $a=0,53$, $b=1,5$, $c=1,09$ для дизелів [3]. Не дивно, що й форми графіків у всіх двигунів виходять однаковими. Легко переконатися, що спрощений варіант дає більшу погрішність при побудові ЗШХД: крива $M_e(n)$ навіть не проходить через точку максимального моменту (рис. 1а).

У повному варіанті формула Лейдермана добре описує параболічні ЗШХ класичних двигунів - карбюраторних і дизельних без електронного керування. Втім, у сучасних вприскових двигунів з електронним керуванням конфігурація ЗШХ мало схожа на параболу (рис. 1 в, г). Щоб увести її в матмодель, доводиться апроксимувати вроздріб (рис. 1 б) або застосовувати функції, що утрудняють інтегрування - наприклад, поліноми четвертого-шостого ступеня (рис. 1 в).



а



в

г

а - розрахункова по точній і спрощеній формулі Лейдермана; б -
апроксимирована вроздріб ; в - апроксимирована поліномом 6-го степеня; г -
ЗШХ двигуна із турбонадуванням і прямим пошаровим упорскуванням
 Рисунок 1 – Зовнішні швидкісні характеристики двигунів

Сказане помітно міняє опис процесу розгону й не дозволяє скористатися аналітичними методами рішення диференціального рівняння руху. Однак цього мало, оскільки справжня картина опорів руху складніше звичного уявлення про неї (рис. 2). Різниця найбільш помітна при швидкостях від 0 до 70 км/ч, тобто в режимах міської їзди. При русі накатом уповільнення створюють статичні опори - сумарні дорожні, аеродинамічні й втрати холостого ходу трансмісії. Перші являють собою суму опорів коченню, опорів руху по ухилі й додаткових втрат у підвісці, викликаних нерівностями дороги [6].

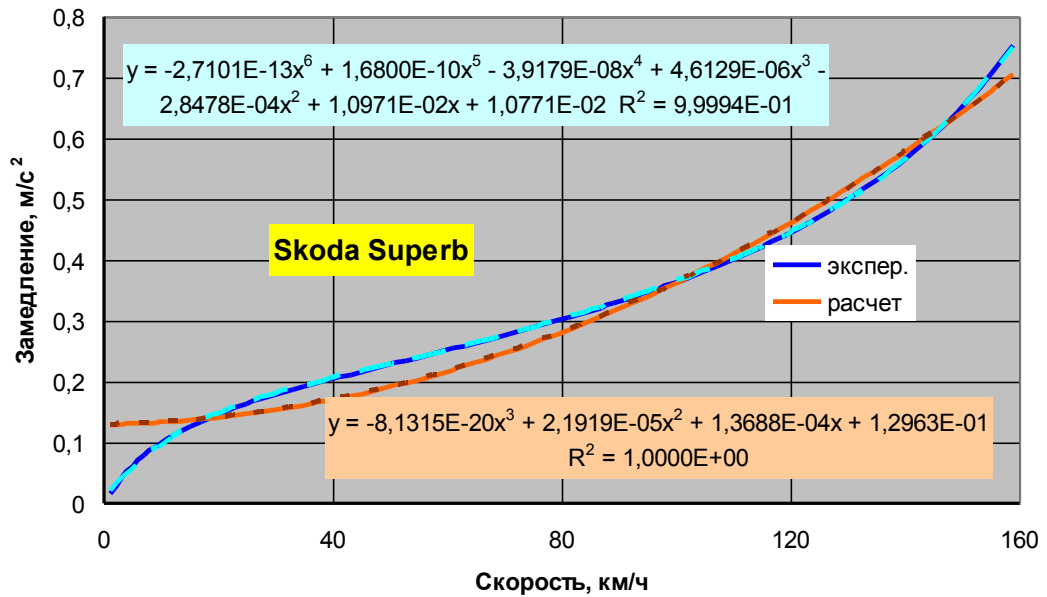


Рисунок 2 – Уповільнення вільного вибігу автомобіля Škoda Superb - розрахункове по загальноприйнятій моделі й експериментальне [4], оброблене за методикою [5]

Якщо дорога горизонтальна й має гладке покриття, дорожні опори зводяться до опорів коченню шин. Звичайно їх вивчають на стендах з барабанами великого діаметра (від 1,7 м і більше) і область найменших швидкостей не зачіпають - мабуть, через специфіку вимірювальних систем стендів. А наша обробка даних вибігу 84 легкових автомобілів з різними шинами [9], виконана за методикою [5], показала, що на швидкостях нижче 25 км/ч спостерігається прогресуючий спад опору коченню - рис. 4.

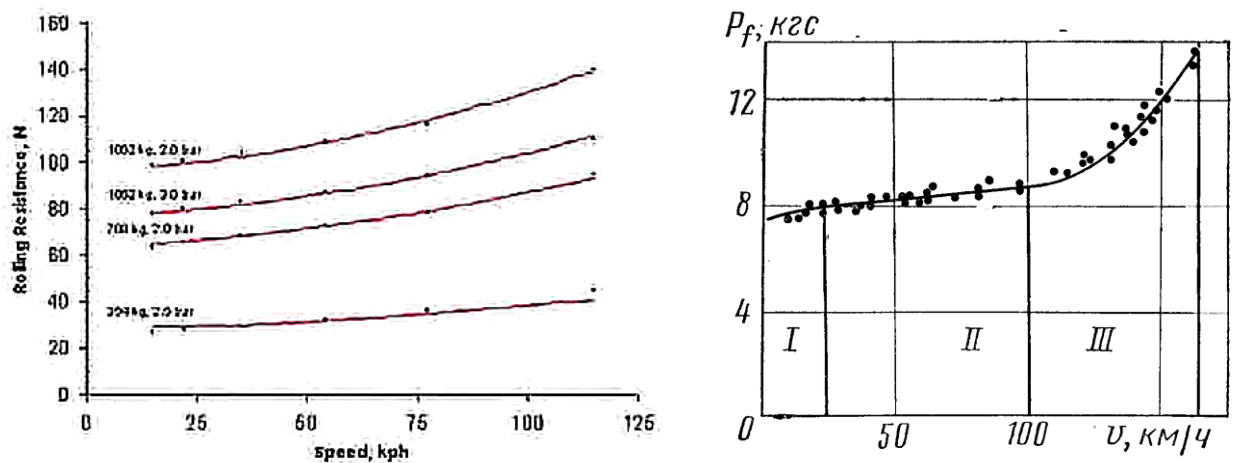


Рисунок 3 – Вплив швидкості на опір коченню [7, 8]

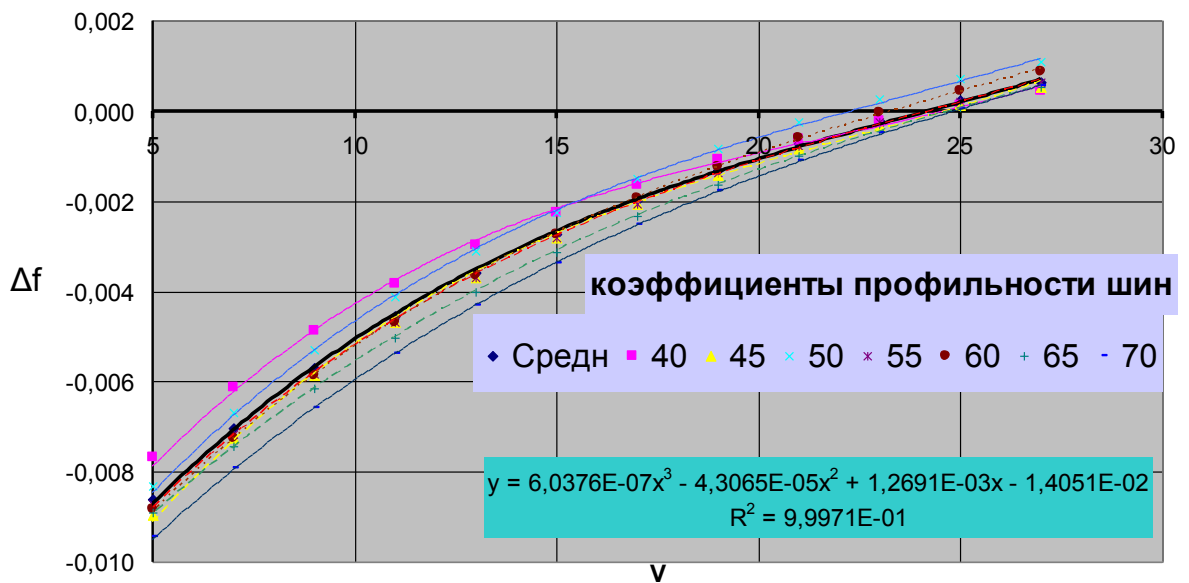


Рисунок 4 – Прогресуючий спад опору коченню на малих швидкостях [9]

Настільки ж традиційний опір повітря обчислюють за формулою

$$P_W = k \cdot F \cdot (v/3,6)^2, \text{ где } k = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho_B, \quad (7)$$

де k - коефіцієнт обтічності, F - лобова площа, м^2 ; C_x - коефіцієнт аеродинамічного опору (у Німеччині C_w , в англійських країнах - C_d); ρ_B - густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$.

У практичних розрахунках приймають $C_x = \text{const}$. Однак ще в 30-х роках ХХ століття [11] було відомо, що це не так (рис. 5), знають це й зараз всі фахівці [12]. В аеродинамічній трубці вимірюють швидкість повітряного потоку й силу аеродинамічного опору, а значення C_x обчислюють при допущенні, що показник степеня при швидкості дорівнює 2, і це загальноприйнята практика.

Однак ті самі експериментальні результати можна інтерпретувати по-різному. Фахівцям автотранспорту зручно порівнювати різні автомобілі за значенням коефіцієнта аеродинамічного опору C_x , вважаючи його постійною характеристикою даного об'єкта. Тоді залишається визнати змінним показник степеня при швидкості, що ніяк не суперечить теоретичним уявам.



Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта аеродинамічного опору від швидкості [10]

. Обробка результатів полігонних випробувань 84 легкових автомобілів дозволила одержати показану на рис. 6 залежність показника степеня від швидкості.

Крім того, деякі експерименти [12] показують нелінійну залежність опору повітря від лобової площі на малих швидкостях:

$$F_r = \alpha \frac{S^{5/4}}{\delta} v^{5/2} \quad (8)$$

де S – лобова площа, v – швидкість.

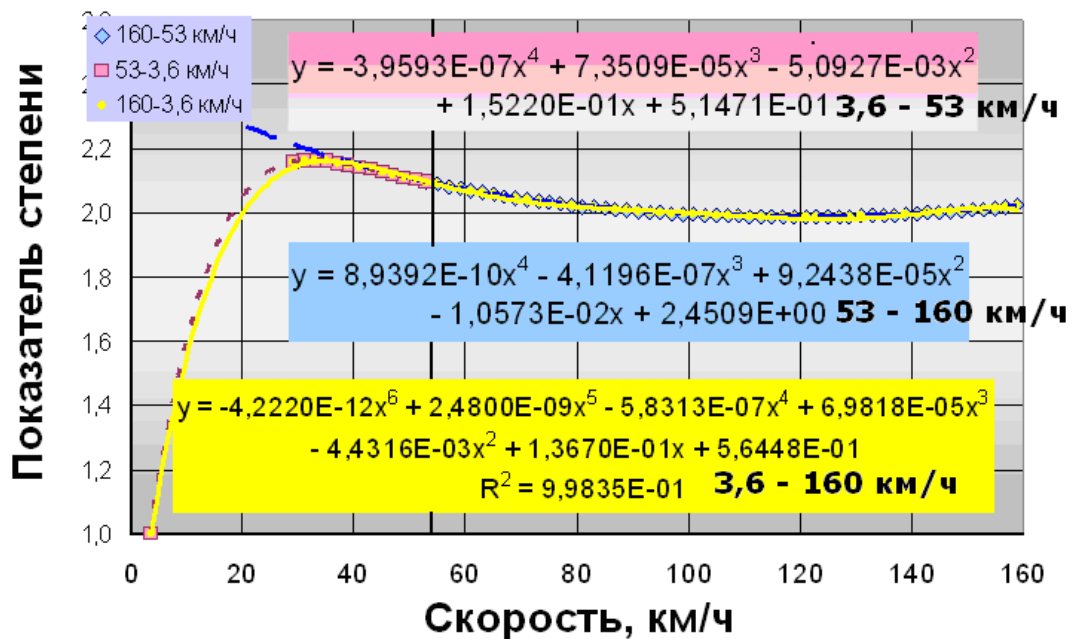


Рисунок 6 – Показник степеня при швидкості у формулі опору повітря

Опори холостого ходу трансмісії вивчав проф. В.В. Московкін. Він показав, що це досить вагомий внесок в опір руху накатом (того ж порядку, що й опір коченню) і запропонував описувати його лінійною залежністю $P_{xx} = a + P_0$. Наші дослідження показали більше складний характер цієї залежності (рис.7).

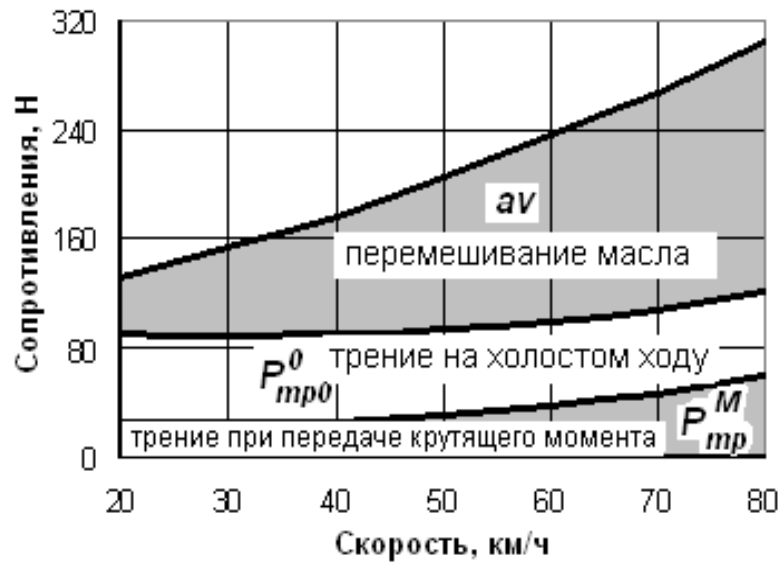


Рисунок 7 – Структура опорів у трансмісії вантажного автомобіля 4×2 при русі по горизонтальній дорозі [73]

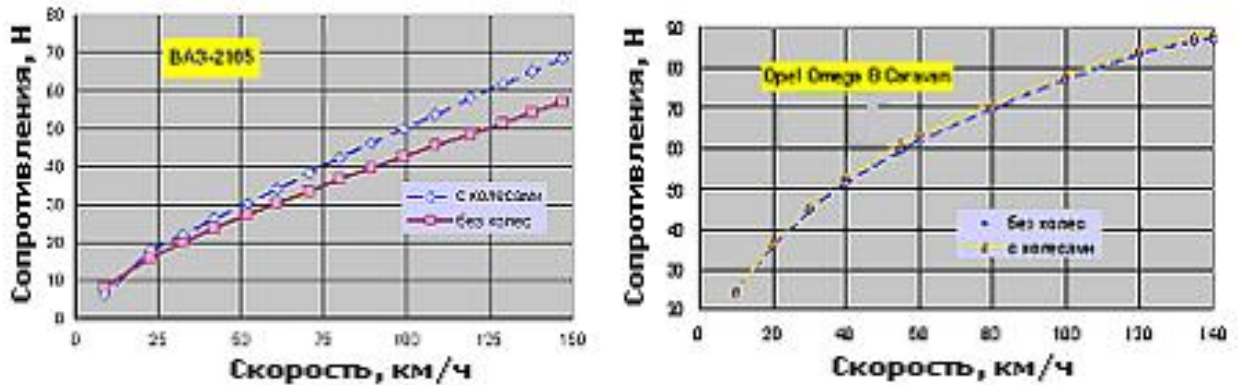


Рисунок 8 – Опори холостого ходу трансмісії легкових автомобілів [92, 93]

Таким чином, реальна картина сил, що діють при русі автомобіля, помітно складніше звичного хрестоматійного опису.

Список літератури

1. Краткий автомобильный справочник. / А.М. Понизовский, Ю.М. Власко, М.Б. Ляликов [и др.] / М.: АО «ТРАНСКОСАЛТИНГ», НИИАТ. – 1994. – 779 с.
2. Проектирование трансмиссий автомобилей. Справочник. Под общ. ред. А.И. Гришкевича. М., Машиностроение, 1984 — 272 с.
3. Чернышев В.А. Тягово-динамический и топливно-экономический расчет автомобиля: Методические рекомендации по выполнению курсовой работы. – М.: МГАУ, 2002. – 39 с.
4. Диваков А. Сравнительный тест. Второй эшелон / Александр Диваков, Олег Расстегаев / Авторевю. – № 21. – 2003.
5. Рабинович Э.Х. Расчет коэффициентов сопротивлений движению автомобиля по пути выбега / Рабинович Э.Х., Волков В.П., Белогуров Е.А. // Вестник ХНАДУ. Сб. научн. тр. – Харьков: Изд-во ХНАДУ.– 2009. – Вып. 44. – С.30-34.
6. Говорущенко Н.Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте. — М.: Транспорт, 1990. — 135 с.
7. The Pneumatic Tire / U.S. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration. DOT HS 810 561 2006. 707 с. / [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nhtsa.gov/staticfiles/safecar/pdf/Pneumatic_Tire_HS-810-561.pdf
8. Работа автомобильной шины / [Кнороз В.И., Кленников Е.В., Петров И.П. и др.]; под ред. В.И. Кнороза.—М.: Транспорт.—1976.—239 с.
9. Сопротивление движению легкового автомобиля на малых скоростях / [Волков В.П., Рабинович Э.Х., Руденко Е.Е. и др.] / Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2012. — Випуск 25. — с. 214-220.
10. Лесникова Н. Аэродинамика автомобиля / Лесникова Н. / Техническая энциклопедия. Том 2 с. 10-23. Второе изд., испр. и доп. Гл. ред-я техн. энциклопедий и словарей. М.: ОНТИ НКТП СССР. 1937 г. 1223 с.
11. Drag CRISIS! The Coefficient of Drag is NOT a Constant! / Электронный ресурс. / Режим доступа к статье: <http://realworldnumbers.wordpress.com/2008/01/22/drag-crisis-the-coefficient-of-drag-is-not-a-constant>
12. Герасимов С.А. Динамический режим аэродинамического сопротивления / Герасимов С.А. // Современные наукоемкие технологии. – 2007. – № 8 – С. 19-22.