

Дослідження енергоємності транспортної операції

В.Ю. Ільченко, професор
О.Д. Деркач, В.О. Колбасін, кандидати технічних наук

Викладено методику і результати енергетичної оцінки транспортної операції за енергоємністю паливно-мастильних матеріалів, праці людини та транспортних засобів. Встановлена залежність енергоємності транспортної операції від вантажопідйомності автомобіля як в цілому, так і, зокрема, для бортових автомобілів та самоскидів. Визначена енергетична структура витрат енергії на паливно-мастильні матеріали, працю людини і енергоємність транспортного засобу.

Енергетична оцінка транспортних операцій виникла в умовах ринкових відносин у сільськогосподарському виробництві, оскільки цінова політика виробництва сільськогосподарської продукції й транспортного забезпечення характеризується нестабільністю.

Автори досліджень з енергетичної оцінки технологічних операцій у виробництві сільськогосподарських культур вважають, що суть енергетичної оцінки технологічних процесів і операцій визначається відношенням кількості одержаної енергії до кількості витраченої [1–4]. Отже, є можливість оцінити ефективність тієї чи іншої технології, що застосовується.

При цьому енергетична оцінка транспортних операцій, що мають місце в цих технологіях, не проводилася.

Виконання транспортної операції включає такі ресурси: паливно-мастильні матеріали; працю людини; транспортне обслуговування.

Метою роботи є дослідження енергоємності транспортної операції, яку виконано автомобілем однієї марки та парком автомобілів різних марок.

Облік витрати палива автомобілем проводиться за лінійною нормою і питомою витратою ($H_{m-км}$). Лінійна норма є основою для розрахунку питомої витрати, яка дозволяє враховувати експлуатаційні показники роботи рухомого складу і оцінювати організацію транспортного процесу.

Для вантажних автомобілів однієї марки питому витрату палива (г/т-км) без урахування різних надбавок [5] визначають за формулою

$$H_{m-км} = 10 \cdot \rho \cdot \frac{H_{км} + H_{\partial} \cdot q \cdot (2\beta \cdot \gamma - 1)}{q \cdot \beta \cdot \gamma}, \quad (1)$$

де ρ – густина палива, г/см³ (для бензину $\rho = 0,72–0,75$; для дизельного палива $\rho = 0,82–0,85$);

$H_{км}$ – лінійна норма витрати палива, л/100 км;

q – вантажопідйомність автомобіля, т;

H_{∂} – додаткова норма витрати палива, л/100 км (для автомобіля з карбюраторним двигуном $H_{\partial} = 2$; з дизельним – $H_{\partial} = 1,3$);

β – коефіцієнт використання пробігу (відношення пробігу з вантажем до загального);

γ – коефіцієнт використання вантажопідйомності.

Енергоємність транспортної роботи (МДж/т-км) автомобіля однієї марки дорівнює

$$E_{m-км} = E_{нал} + E_{пл} + E_{мз}, \quad (2)$$

де $E_{нал}$, $E_{пл}$, $E_{мз}$ – енергоємність відповідно палива, праці людини, транспортних засобів, МДж/т-км.

Енергоємність палива розраховують за формулою

$$E_{нал} = \frac{H_{m-км} \cdot \alpha_{нал}}{1000}, \quad (3)$$

де $H_{m-км}$ – питома витрата палива, г/т-км;

$\alpha_{нал}$ – енергетичний еквівалент палива, МДж/кг. Для сільськогосподарських підприємств України прийнято, що $\alpha_{нал} = 79,5$ МДж/кг.

Енергоємність праці людини дорівнює

$$E_{пл} = Z_{пл} \cdot \alpha_{пл} = \frac{n_{мех}}{q \cdot V} \cdot \alpha_{пл}, \quad (4)$$

де $Z_{пл}$ – затрати праці, люд.-год/т-км;

$\alpha_{пл}$ – енергетичний еквівалент праці людини, МДж/люд.-год;

$n_{мех}$ – чисельність людей, які обслуговують транспортний засіб, чол.;

V – швидкість руху транспортного засобу, км/год;

q – вантажопідйомність транспортного засобу, т.

Енергоємність транспортного засобу обчислюють як

$$E_{мз} = Z_{пл} \cdot \alpha_{мз}, \quad (5)$$

де $\alpha_{мз}$ – енергетичний еквівалент транспортного засобу, МДж/год.

Якщо енергетичний еквівалент транспортного засобу відсутній, то його визначають за формулою

$$\alpha_{мз} = \alpha_{птз} \cdot M_{мз}, \quad (6)$$

де $\alpha_{птз}$ – питомий енергетичний еквівалент транспортного засобу; для вантажних автомобілів він становить 0,0143 МДж/кг-год; для причепів і напівпричепів – 0,0263; для навантажувачів на базі автомобілів – 0,046;

$M_{мз}$ – маса транспортного засобу, кг.

Розрахунок енергоємності транспортної операції, виконаної автомобілем однієї марки за формулами (1–6), включає:

■ автомобіль ГАЗ-5204 вантажопідйомністю 2,5 т, якщо він експлуатується в таких умовах: коефіцієнт використання пробігу $\beta = 0,51$; коефіцієнт використання вантажопідйомності $\gamma = 1,0$; лінійна норма витрати палива $H_{км} = 22$ л/100 км; густина бензину $0,73$ г/см³; енергетична ціна становить 11,11 МДж/т-км (2);

■ автомобіль КамАЗ-5321 вантажопідйомністю 10 т, якщо він використовується в таких умовах: $\beta = 0,51$; $\gamma = 1$; лінійна норма витрати

палива $H_{км} = 22$ л/100 км; густина дизельного палива $0,83$ г/см³; енергетична ціна $3,81$ МДж/т-км (2);

■ автомобіль-самоскид ГАЗ-3507 вантажопідйомністю 4 т, якщо він працює в таких умовах: $\beta = 0,51$; $\gamma = 1$; $H_{км} = 29,5$; густина бензину $0,73$ г/см³; енергетична ціна $9,25$ МДж/т-км (2).

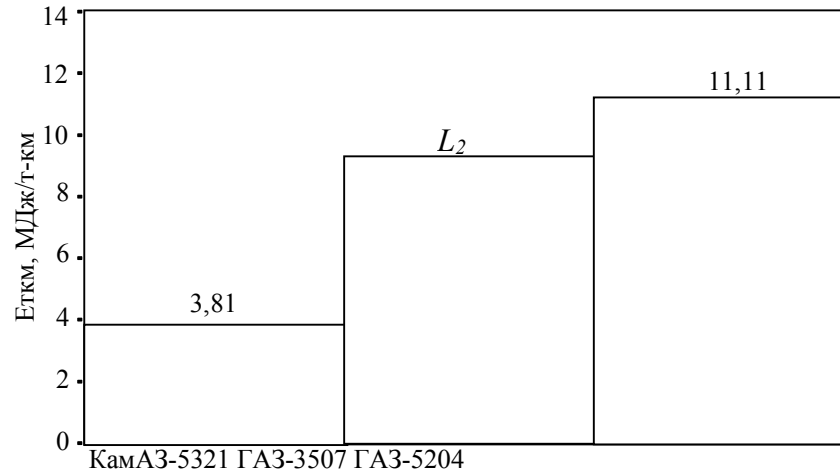


Рис. 1. Енергоємність транспортної роботи, виконаної різними автомобілями

За даними розрахунку будують графік зміни енергоємності транспортної роботи різними автомобілями (рис. 1). Як бачимо, найвища енергоємність транспортної роботи досягнута з використанням автомобіля ГАЗ-5204, а найнижча – КамАЗ-5321, тобто за рахунок вибору автомобіля енергоємність транспортної роботи можна знизити в 2,9 рази.

Для визначення питомої витрати палива для парку автомобілів різних марок необхідно замість лінійної норми $H_{км}$ і вантажопідйомності q визначити середньозважені значення $H_{км}^6$ і q^6 за формулами:

$$H_{км}^6 = \frac{\sum_{j=1}^n (H_{км,j} \cdot A_j)}{\sum_{j=1}^n A_j}; \quad (7)$$

$$q^6 = \frac{\sum_{j=1}^n (q_j \cdot A_j)}{\sum_{j=1}^n A_j}, \quad (8)$$

де $H_{км,j}$ – лінійна норма витрати палива j -ої марки автомобіля, л/100 км;

q_j – вантажопідйомність j -ої марки автомобіля, т;

A_j – кількість автомобілів j -ої марки.

Питома витрата палива (г/т-км) для парку автомобілів різних марок дорівнюватиме

$$H_{т-км}^6 = 10\rho \frac{H_{км}^6 + H_{д} \cdot q^6 (2 \cdot \beta \cdot \gamma - 1)}{q^6 \cdot \beta \cdot \gamma}, \quad (9)$$

де $H_{т-км}^6$ – середньозважене значення лінійної норми витрати палива парку автомобілів різних марок, л/100 км;

H_0 – додаткова норма витрати палива, л/100 км (для автомобіля з карбюраторним двигуном 2,0; з дизельним – 1,3);

q^6 – середньозважена вантажопідйомність парку автомобілів різних марок, т;

β – коефіцієнт використання пробігу, тобто відношення пробігу з вантажем до загального;

γ – коефіцієнт використання вантажопідйомності, тобто відношення перевезеного вантажу до номінальної вантажопідйомності або виконаних тонно-кілометрів до можливих (які могли б виконати за повного використання номінальної вантажопідйомності).

Енергоємність палива (МДж/т-км) для парку автомобілів різних марок дорівнює

$$E_{нал}^n = \frac{H_{т-км}^6 \cdot \alpha_{нал}}{1000}. \quad (10)$$

Середньозважену швидкість руху (км/год) парку автомобілів j -тих марок розраховують як

$$V_j^6 = \sum_{j=1}^n (V_j \cdot A_j) / \sum A_j, \quad (11)$$

де V_j – швидкість руху j -го транспортного засобу, км/год;

A_j – кількість автомобілів j -ої марки.

Середньозважені затрати праці (люд·год/т-км) для парку автомобілів різних марок автомобілів обчислюють за рівнянням

$$Z_{нл}^6 = \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_j}{q_j \cdot V_j^6} \cdot A_j \right) / \sum_{j=1}^n A_j, \quad (12)$$

де P_j – чисельність людей, які обслуговують j -тий автомобіль;

q_j – номінальна вантажопідйомність j -того транспортного засобу, т;

n – кількість автомобілів j -тих марок у парку машин.

Енергоємність праці людини (МДж/т-км) для парку автомобілів різних марок дорівнює

$$E_{нл}^n = Z_{нл}^6 \cdot \alpha_{нл}, \quad (13)$$

де $\alpha_{нл}$ – енергетичний еквівалент праці людини, МДж/люд.-год; для водія, механізатора $\alpha_{нл} = 43,4$.

Енергетичний еквівалент кожної марки автомобіля становить

$$\alpha_{мз,j} = \alpha_{нл} \cdot M_{мз,j}, \quad (14)$$

де $M_{мз,j}$ – маса j -го транспортного засобу, кг.

Середньозважений енергетичний еквівалент парку машин дорівнює

$$\alpha_{мз}^6 = \sum_{j=1}^n (\alpha_{мз,j} \cdot A_j) / \sum_{j=1}^n A_j, \quad (15)$$

де $\alpha_{мз,j}$ – енергетичний еквівалент j -го транспортного засобу, МДж/год.

Енергоємність транспортних засобів (МДж/т-км) для парку автомобілів різних марок розраховують як

$$E^n_{mз} = 3^n_{пл} \cdot \alpha^n_{mз}. \quad (16)$$

Енергоємність транспортної роботи парку автомобілів різних марок дорівнює, МДж/т-км

$$E^n_{m-км} = E^n_{пал} + E^n_{пл} + E^n_{mз}. \quad (17)$$

Розрахунок енергоємності транспортної операції, виконаної парком автомобілів з карбюраторними двигунами (ГАЗ-5204 – 3 од., ГАЗ-3507 – 4 од.) за таких умов використання: $\beta = 0,5$; $\gamma = 1$; $H_{км} = 22$ л/100 км пробігу (ГАЗ-5204); $H_{км} = 29,5$ л/100 км пробігу (ГАЗ-3507) формули (7–17); енергетична ціна 11,2 МДж/т-км (17).

Розрахунок енергоємності транспортної операції, виконаної парком автомобілів з дизельними двигунами (КамАЗ-5321 – 2 од.; КраЗ-6332 – 3 од.) за таких умов $\beta = 0,5$; $\gamma = 1$; $H_{км} = 25$ л/100 км пробігу (КамАЗ-5321); $H_{км} = 36$ л/100 км пробігу (КраЗ-6332) – формули (7–17); енергетична ціна 6,5 МДж/т-км (17).

Енергоємність транспортної роботи парку автомобілів з дизельними двигунами (КамАЗ-5321 – 2 од. і КраЗ-6332 – 3 од.) складає 6,52 МДж/т-км, а для парку автомобілів з карбюраторними двигунами (ГАЗ-5204 – 3 шт. і ГАЗ-3507 – 4 од.) – 10,22 МДж/т-км. Тобто за рахунок використання парку автомобілів з дизельними двигунами енергоємність транспортної роботи можна знизити на 36,4 %.

Дослідження енергоємності транспортної операції, виконаної бортовими вантажопідійомними автомобілями. За даними розрахунку енергоємності праці людини, палива, транспортного засобу і в цілому транспортної операції складена табл. 1 зміни енергоємності транспортної операції.

1. Енергоємність транспортної операції, виконаної бортовими вантажними автомобілями

Марка автомобіля	Вантажопідійомність, т	Питома витрата палива, г/т-км	Тип двигуна: карбюраторний, дизельний	Заграти праці, люд/год/т-км	Енергоємність, МДж/т-км			
					праці людини	палива	транспортного засобу	транспортної операції
ГАЗ-5204	2,5	128,1	К	0,0132	0,58	10,8	0,4757	11,2357
ГАЗ-5304	4,5	94,1	К	0,0102	0,32	7,48	0,4741	8,2741
ГАЗ-3307	4,5	87,7	К	0,0100	0,32	6,97	0,4776	7,7676
ЗИЛ-4333	6,0	83,0	Д	0,0067	0,24	6,59	0,4742	7,3042
ЗИЛ-4335	6,0	77,1	Д	0,0068	0,24	6,13	0,4735	6,8435
ЗИЛ-130-76	6,0	75,7	К	0,0077	0,24	6,02	0,4735	6,7335
Урал-4320	7,0	75,6	Д	0,0042	0,21	5,96	0,4745	6,6445
ГАЗ-3309	4,5	73,5	Д	0,0090	0,32	5,84	0,4736	6,6336
КамАЗ-4311	8,0	49,9	Д	0,0045	0,18	3,97	0,4762	4,6262
КраЗ-257Б	12,0	49,9	Д	0,0032	0,12	3,97	0,4706	4,5606
МАЗ-5338	8,0	47,8	Д	0,0045	0,18	3,80	0,4794	4,4594
МАЗ-5337	8,0	45,8	Д	0,0042	0,18	3,64	0,4769	4,2969
КамАЗ-5321	10,0	41,7	Д	0,0041	0,14	3,32	0,4808	3,9408
МАЗ-6303	14,5	34,7	Д	0,0034	0,10	2,76	0,4736	3,3336

Найнижча енергоємність транспортної роботи зареєстрована в разі використання автомобіля МАЗ-6303, а найвища – автомобіля ГАЗ-5204 (табл. 1), тобто за рахунок вибору автомобіля енергоємність транспортної операції можна зменшити в 3,4 рази.

В інших досліджуваних автомобілів енергоємність тонно-кілометра зростала несуттєво: КамАЗ-5321 на 18,2; МАЗ-5337 – на 28,9; МАЗ-5338 – на 33,8; КрАЗ-257Б – на 36,8 і КамАЗ-4311 на 38,8 %. Їх можна використовувати на перевезенні сільськогосподарських вантажів. Решта автомобілів давала зростання енергетичної ціни одного тонно-кілометра на 98,9–237 %, що свідчить про недоцільність використання їх на транспортних операціях.

В інших досліджуваних автомобілів енергоємність тонно-кілометра зростала несуттєво: КамАЗ-5321 на 18,2; МАЗ-5337 – на 28,9; МАЗ-5338 – на 33,8; КрАЗ-257Б – на 36,8 і КамАЗ-4311 на 38,8 %. Їх можна використовувати на перевезенні сільськогосподарських вантажів. Решта автомобілів давала зростання енергетичної ціни одного тонно-кілометра на 98,9–237 %, що свідчить про недоцільність використання їх на транспортних операціях.

Енергетична структура витрат енергії бортового вантажного автомобіля показала, що найбільші витрати енергії припадають на паливо. На працю людини вони складають 3,0–5,2 МДж/т-км, а енергоємність транспортного засобу 10,3–12,2 МДж/т-км (рис. 2).

Обробка статистичних даних з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel показала, що найкраще залежність енергоємності транспортної операції від вантажопідйомності бортового вантажного автомобіля описується рівнянням у вигляді параболі третього ступеня з імовірністю $R^2 = 0,90$;

$$E_{заг} = -0,005q^3 + 0,201q^2 - 2,734q + 16,69. \quad (18)$$

Описуючи цю залежність рівнянням параболі другого степеня, бачимо, що ймовірність знижується до $R^2 = 0,89$:

$$E_{заг} = 0,070q^2 - 1,765q + 14,62. \quad (19)$$

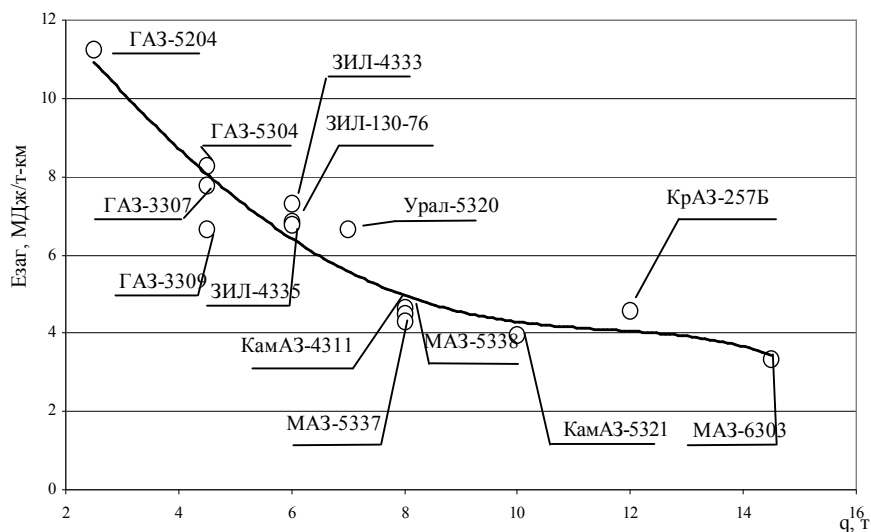


Рис. 2. Залежність енергоємності транспортної операції від вантажопідйомності бортового автомобіля

Дослідження енергоємності транспортної операції, яку виконували автомобілями-самоскидами. За даними розрахунку енергоємності праці людини, палива, транспортного засобу і в цілому транспортної операції складена табл. 2 – зміна енергоємності транспортної операції, яку виконували автомобілями-самоскидами різних марок. Найменша енергоємність транспортної роботи в автомобіля-самоскида КамАЗ-5510, найбільша в автомобіля САЗ-3502, тобто за рахунок вибору автомобіля енергоємність транспортної операції можна зменшити в 2,8 раза.

В автомобілів-самоскидів КамАЗ-5511, МАЗ-5551, КрАЗ-256Б енергоємність операції зростає не суттєво, тому їх доцільно використовувати під час перевезення сільськогосподарських вантажів. Щодо автомобілів-самоскидів ЗИЛ-ММЗ-4508, ГАЗ-3509, ГАЗ-3507, Урал-5537 і САЗ-3502, то енергетична ціна тонно-кілометра, в разі їх роботи зростає відповідно на 87,4; 96,4; 128,8; 135,3 і 182,4 %; отже, використання їх на перевезеннях економічно невигідно.

Енергетична структура витрат енергії автомобіля-самоскида показала, що найбільші витрати енергії припадають на паливо (85,9–92,0 МДж/т-км), на працю людини (2,6–3,9 МДж/т-км), а енергоємність транспортного засобу складає 3,8–10,0 МДж/т-км.

Залежність енергоємності транспортної операції від вантажопідйомності автомобіля-самоскида показана на рис. 3. Розрахунки (табл. 2) підтверджують, що найкраще ця залежність описується параболою четвертого степеня з імовірністю $R^2 = 0,96$.

$$E_{заг} = 0,035q^4 - 1,088q^3 + 11,63q^2 - 52,03q + 90,98. \quad (20)$$

2. Енергоємність транспортної операції, яку виконували автомобілями-самоскидами

Марка автомобіля	Вантажопідйомність, т	Питома витрата палива, г/ткм	Тип двигуна: карбораторний, дизельний	Затрати праці, люд.-год / т-км	Енергоємність, МДж/т-км			
					праці людини	палива	транспортного засобу	транспортної операції
ГАЗ-3507	4,0	107,5	К	0,0083	0,36	8,55	0,4748	9,3848
САЗ-3502	3,2	134,1	К	0,0104	0,45	10,66	0,4759	11,5859
ГАЗ-3509	4,0	90,8	Д	0,0083	0,36	7,22	0,4748	8,0548
КамАЗ-5510	10,0	48,3	Д	0,0033	0,15	3,84	0,4719	4,1019
КамАЗ-5511	10,0	48,3	Д	0,0033	0,15	3,84	0,4719	4,4619
ЗИЛ-ММЗ-4508	5,5	90,0	Д	0,0061	0,26	7,13	0,2968	7,6868
МАЗ-5551	12,0	49,9	Д	0,0028	0,12	3,97	0,4805	4,5705
Урал-5537	6,0	112,5	Д	0,0055	0,24	8,94	0,4708	9,6508
КрАЗ-256Б	12,0	52,6	Д	0,0028	0,12	4,18	0,4805	4,7805

Описуючи цю залежність параболою третього степеня, бачимо, що імовірність знижується до $R^2 = 0,86$

$$E_{заг} = 0,014q^3 - 0,255q^2 + 0,533q + 10,80. \quad (21)$$

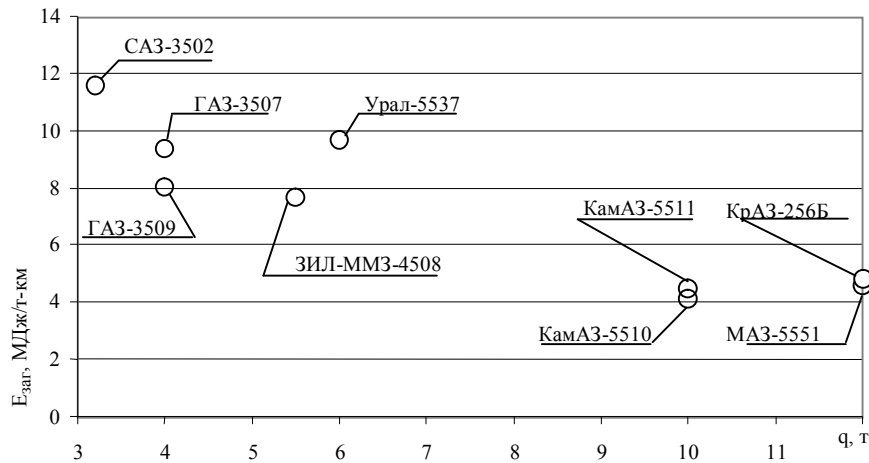


Рис. 3. Залежність енергоємності транспортної операції від вантажопідйомності автомобіля-самоскида

Залежність енергоємності транспортної операції від вантажопідйомності бортових автомобілів і самоскидів. За даними розрахунку енергоємності транспортної операції, яку виконували бортовими вантажними автомобілями (табл. 1) і автомобілями-самоскидами (табл. 2), побудовано графік залежності енергоємності транспортної операції від їх вантажопідйомності (рис. 4).

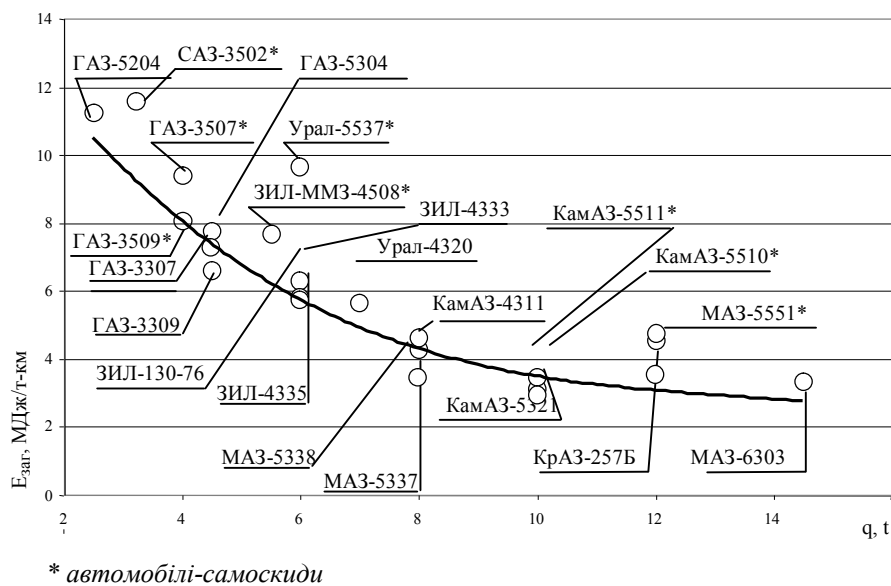


Рис. 4. Залежність енергоємності транспортної операції від вантажопідйомності бортових та автомобілів-самоскидів

Математична обробка цих даних табл. 1 і 2 показала, що залежність енергоємності транспортної операції від вантажопідйомності як бортових автомобілів і самоскидів описується рівнянням параболі третього степеня з імовірністю $R^2 = 0,84$;

$$E_{zag} = -0,004q^3 + 0,196q^2 - 2,749q + 17,24. \quad (22)$$

Одержані залежності можна використовувати в процесі проектування і бортових автомобілів і самоскидів.

Застосування прикладної програми Microsoft Excel. Створюючи поступово базу даних характеристик автомобілів або будь-яких інших енергетичних засобів, можна отримати необхідну залежність з рівнянням, що її описує.

Висновки

Найвища енергоємність транспортної роботи в процесі використання автомобіля ГАЗ-5204, а найнижча – КамАЗ-5321; за рахунок вибору автомобіля енергоємність транспортної роботи можна зменшити майже втричі.

За рахунок використання парку автомобілів з дизельними двигунами енергоємність транспортної роботи можна зменшити в 3,72 рази.

Найнижча енергоємність транспортної роботи в автомобіля-самоскида КамАЗ-5510, а найвища в автомобіля САЗ-3502. Таким чином, за рахунок вибору автомобіля енергоємність транспортної операції можна зменшити в 2,8 рази.

Енергетична структура витрат енергії бортових вантажних автомобілів та автомобілів-самоскидів показала, що найвищі витрати енергії припадають на паливо та на транспортний засіб. Енергоємність праці людини є незначною.

Бібліографія

1. *Медведовський О.К., Іваненко П.І.* Енергетичний аналіз інтенсивних технологій в сільськогосподарському виробництві. – К.: Урожай, 1991. – 217 с.
2. *Пастухов В.І.* Енергетична оцінка механізованих технологій рослинництва // *Методи і результати.* – Харків: “Ранок НТ”, 2003. – 100 с.
3. *Практикум з використання машин у рослинництві / В.Ю. Ільченко, А.С. Кобець, В.П. Мельник та ін.* – Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2002 – 212 с.
4. *Ільченко В.Ю., Боцуляк С.В.* Проектування сервісних підприємств технічного обслуговування. – Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2004. – 148 с.
5. *Ускоренный метод определения удельного расхода автомобильного топлива / В.А. Рубцов, К.И. Луковин, В.М. Шафорост, В.А. Черныш.* // *Автодорожник Украины.* – 1984. – № 4. – С. 19.