

АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБСЯГІВ ДИСПЕРГУВАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ РЕЧОВИН АВТОТРАНСПОРТНИМ ПОТОКОМ ПРИ РУЙНУВАННІ АВТОДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Л. С. Шелудченко, О. В. Овчарук

Подільський державний аграрно-технічний університет
вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, 32300, Україна. E-mail: seludcenkolesa@gmail.com

В. Л. Носко

Бережанський агротехнічний інститут
вул. Академічна, 20, м. Бережани, 47501, Україна. E-mail: noskovasil@ukr.net

Наведено результати графоаналітичного визначення обсягів утворення диспергованих мінеральних матеріалів в зоні контакту “дорога-рушій автотранспортного засобу” для автодоріг категорій 1-а, 1-б, 2, 3, 4 і 5, які зумовлені зношуванням та руйнуванням матеріалів конструкції дорожнього одягу, в результаті фретінг-втоми, пітінгового пошкодження, утворення каверн і макротріщин. Розроблено аналітичну модель каверни дорожнього покриття на підставі аналізу характеру процесів руйнування дорожнього одягу та проведено аналітичне дослідження об'ємів утворення дезінтегрованих мінеральних речовин в залежності від рівня руйнування автодорожнього покриття. Основні дисперговані компоненти, які розглядаються, це сажа, мінеральний пил, як продукт зношування дорожнього одягу, гумову крихту, оксиди металів, азбестовмісні частинки речовин, які використовуються в об'єктах автотранспорту. Таким чином, результатом даного дослідження є визначення обсягів викидів мінерального пилу та їх частки, які диспергуються в атмосферному повітрі автомобільної дороги, що дає можливість оптимізувати заходи захисту придорожніх ландшафтів в умовах розвиненої автотранспортної мережі та забезпечити їх екологічну безпеку.

Ключові слова: автомобільна дорога, мінеральні матеріали, дорожнє покриття, каверна.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ПОТОКОМ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА ПРИ РАЗРУШЕНИИ АВТОДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Л. С. Шелудченко, О. В. Овчарук

Подольский государственный аграрно-технический университет
ул. Шевченка, 13, г. Каменец-Подольский, 32300, Украина. E-mail: seludcenkolesa@gmail.com

В. Л. Носко

Бережанский агротехнический институт
ул Академическая, 20, г. Бережаны, 47501, Украина. E-mail: noskovasil@ukr.net

Приведены результаты графоаналитического определения объемов образования диспергированных минеральных материалов в зоне контакта “дорога-двигатель автотранспортного средства” для автодорог категории 1-а, 1-б, 2, 3, 4 и 5, которые обусловлены износом и разрушением материалов конструкции дорожной одежды в результате фретинг-усталости, питингового повреждения, образованию каверн и макротрещин. Разработана аналитическая модель каверны дорожного покрытия на основании анализа характера процессов разрушения дорожной одежды и проведено аналитическое исследование объемов образования дезинтегрированных минеральных веществ в зависимости от уровня разрушения покрытия. Главные диспергированные компоненты, которые рассматриваются, это сажа, минеральная пыль, как продукт износа дорожной одежды, окиси металлов, частицы веществ, которые используются в объектах автотранспорта. Определение объемов выбросов минеральной пыли и их частиц, которые диспергируются в атмосферном воздухе автомобильной дороги, дают возможность оптимизировать меры защиты придорожных ландшафтов в условиях развитой автотранспортной сети и обеспечить их экологическую безопасность.

Ключевые слова: автомобильная дорога, минеральные материалы, дорожное покрытие, каверна.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Одним з найнебезпечніших чинників впливу автотранспортного комплексу на довкілля є викиди пилових аерозолів продуктованих автотранспортними засобами і різних як за своїм походженням, складом і структурою, так і за обсягами. До основних диспергованих компонентів зазначених пилових забруднювачів необхідно віднести: нерозчинний твердий вуглець (сажу), мінеральний пил (продукти зношування

дорожнього одягу), гумову крихту, оксиди металів, азбестовмісні частинки речовин, які використовуються в об'єктах автотранспорту (гальмівні колодки, диски зчеплення) [4, 7].

Найбільші обсяги утворення мінерального пилу та гумової крихти спостерігаються в зоні контакту “дорога-рушій автотранспортного засобу” і зумовлені зношуванням та руйнуванням (дезінтеграцією мінеральних матеріалів конструкції) автодороги в результаті фретінг-втоми

Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля

[5], пітінгового пошкодження [5, 7], утворення каверн і макротріщин у дорожньому одязі [7]. Загальні обсяги утворення мінерального пилу для автомобільної дороги категорії II (інтенсивність автотранспортного потоку >2000 авт/год) варіюють в межах 9-14 кг/год×км. Обсяги утворення гумової крихти за рахунок гістерезисного (механіко-хімічного) та абразивного зношування становить 0,2-0,8 кг/год×км залежно від якості дорожнього покриття, конструкції шини, малюнку протектора, складу гуми, технічного стану автомобіля, швидкості руху транспортних потоків, температури шини і навколишнього атмосферного повітря тощо [4].

Тут і в подальшому під дезінтеграцією будемо розуміти процес подрібнення мінералів (багатокомпонентної мінеральної суміші) конструкції автомобільної дороги, яка утворена відносно слабо зв'язаними поміж собою складовими частинами. Метою даної роботи є розроблення аналітичної моделі обсягів диспергування мінеральних речовин автотранспортним потоком в залежності від рівня руйнування дорожнього покриття.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Розроблення аналітичної моделі каверни дорожнього покриття. На підставі аналізу характеру процесів руйнування дорожнього одягу (рис.1, [7]) і за результатами профілювання контурів типових каверн запропоновано графоаналітичну модель поверхні каверни у вигляді еліптичного параболоїду обертання симетричного відносно вертикальної осі z (рис.2а, рис. 2б, 2в), рівняння якого в загальному випадку має вигляд:

$$z = \frac{x^2}{2p} + \frac{y^2}{2q} \tag{1}$$

де $p > 0; q > 0$ – деякі параметри.



Рисунок 1 – Характер профілю каверн поверхонь автомобільних доріг

Об'єм параболоїда обертання за умови обмеження його верхньої частини деякою областю D, яка окреслена колом

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{1}{2}d\right)^2 \tag{2}$$

становитиме:

$$V = \iiint_V dx \cdot dy \cdot dz = \iint_D z(x, y) \cdot dx \cdot dy \tag{3}$$

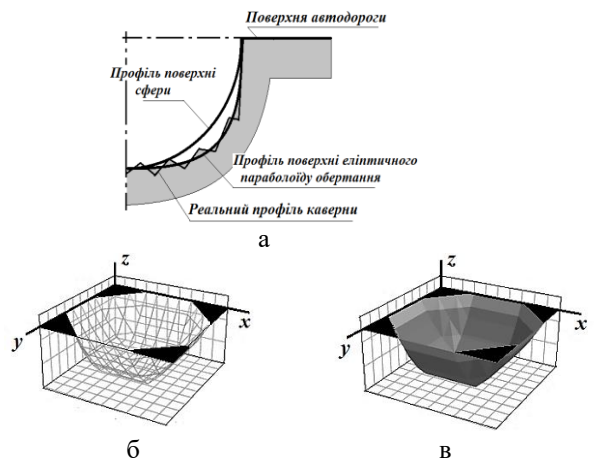


Рисунок 2 – Моделі каверн : а - графоаналітична модель контуру поверхні каверни автомобільної дороги; б - ізолінійна модель дорожньої каверни; в - просторова модель дорожньої каверни

Для визначення об'єму каверни (рис.3), переходимо від декартової системи координат до циліндричної і, з огляду на симетричність параболоїда відносно осі z, знаходимо об'єм четвертої частини параболоїда для $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ (рис.4):

$$v = \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^a \rho \frac{\rho^2 \cdot \cos^2 \varphi + \rho^2 \cdot \sin^2 \varphi}{2d} \cdot d\rho = \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^a \rho \frac{\rho^2}{2d} \cdot d\rho = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \frac{d^{(4-1)}}{2} = \frac{\pi}{32} \cdot d^3. \tag{4}$$

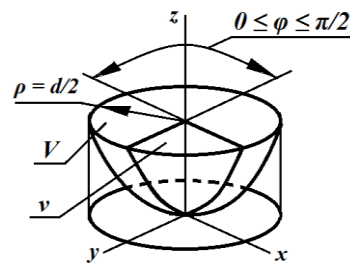


Рисунок 3 – Модель дорожньої каверни в циліндричних координатах

За результатами розв'язання (4) отримуємо значення V об'єму параболоїда:

$$V = 4v = 4 \frac{\pi}{32} d^3 = \frac{\pi}{8} d^3. \tag{5}$$

Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля

Якщо визначити частку зруйнованого полотна проїжджої частини дороги через деякий коефіцієнт k , як:

$$k = \frac{A_k}{A_\Sigma} \quad (6)$$

де A_k – сумарна площа каверн, m^2 ;

A_Σ – площа проїжджої частини автодороги m^2 ; то після відповідних перетворень, отримуємо вираз для визначення обсягів $V_{дз}$ дезінтегрованих мінеральних речовин на довжині в 1 км, при руйнуванні дорожнього одягу автомобільної дороги в залежності від рівня (частки) k його руйнування:

$$V_{дз} = \frac{10^4(a \cdot k)^{3/2}}{\sqrt{0,1\pi}} \quad (7)$$

або:

$$V_{дз} = 1,76 \times 10^4(a \cdot k)^{3/2} \quad (8)$$

де a_i – ширина проїжджої частини дороги визначеної категорії.

Результати аналітичного дослідження об'ємів $V_{дис}$ утворення дезінтегрованих мінеральних речовин на довжині в 1 км, при руйнуванні дорожнього одягу автомобільної дороги [2] в залежності від рівня k його руйнування наведено в таблиці 1 та на рис.4.

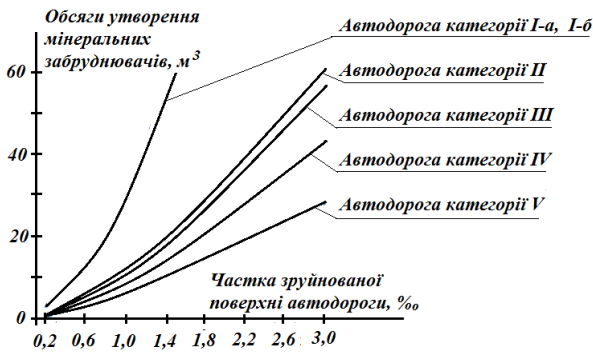


Рисунок 4 – Динаміка утворення диспергованих мінеральних речовин залежно від частки зруйнованої поверхні дорожнього одягу автодороги

За результатами визначення об'ємів дезінтегрованого мінерального матеріалу в результаті руйнування конструкції автомобільної дороги можна розрахувати відповідні масові (кг/год.×км) показники $M_{дз}$ (таблиця 2):

$$M_{дз} = \frac{\gamma \cdot V_{дис}}{t_p} \quad (9)$$

де $\gamma = 1,5...1,8$ (t/m^3) – усереднена густина асфальтобетонних та щебених шарів конструкції автомобільної дороги [1];
 $t_p = 8760$ (год.) – річний фонд часу.

Таблиця 1 – Обсяги утворення дезінтегрованих мінеральних речовин залежно від частки зруйнованої поверхні дорожнього одягу автодороги, m^3

Частка зруйнованого полотна автодороги, $k \times 10^{-3}$ (%)	Категорія автомобільної дороги				
	I-а, I-б	II	III	IV	V
0,20	2,91	1,03	0,93	0,74	0,48
0,40	8,30	2,93	2,65	2,10	1,36
0,60	15,24	5,38	4,87	3,85	2,50
0,80	23,46	8,28	7,49	5,93	3,85
1,00	32,78	11,57	10,46	8,28	5,37
1,20	43,10	15,21	13,76	10,89	7,06
1,40	54,32	19,17	17,34	13,72	8,90
1,60	66,36	23,42	21,18	16,61	10,88
1,80	79,25	27,95	25,28	20,01	12,98
2,00	93,60	32,74	29,61	23,44	15,21
2,20		37,77	34,16	27,04	17,54
2,40		43,03	38,92	30,80	19,99
2,60		48,52	43,88	34,73	22,54
2,80		54,23	49,04	38,82	25,19
3,00		60,14	54,39	43,05	27,93

Дезінтегрована частка $M_{дз}$ мінеральних матеріалів конструкції автомобільної дороги, з огляду на характер процесу їх руйнування (рис. 5) [3, 7]), відрізняється багатокомпонентністю за фракційним складом (для розклинюючих фракцій ~ 0...20 мм – ДСТУ Б.В.2.7-34-2001 [1]). Таким чином, для виокремлення з загального обсягу $M_{дз}$ частки $M_{дис}$ мінерального пилу, який може утворювати забруднюючі аерозолі, необхідно визначити обсяги мінерального пилу з фракційним складом меншим за 500 мкм.

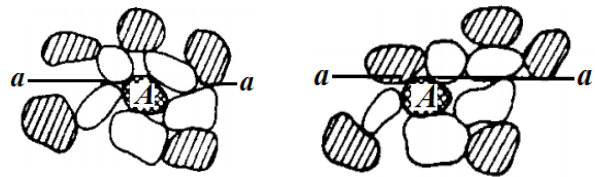


Рисунок 5 – Деформація і зсув сипучого тіла

Графоаналітичне моделювання обсягів диспергування мінеральних матеріалів. Під диспергуванням будемо розуміти процес подрібнення та розподіл в деякому об'ємі мінерального матеріалу в результаті якого в атмосферному повітрі утворюється аерозоль забруднюючих речовин. Фрактально-інваріантною моделлю композиційної будови гетерогенної структури шарів конструкції автомобільної дороги (гравійно-щебенева максимально ущільнена структура) є, так звана, "гіпотеза Кеплера" про максимально щільну упаковку куль у просторі [6].

Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля

Регулярну структуру зазначеної моделі наведено на рис.6.

Таблиця 2 – Маса дезінтегрованих мінеральних речовин залежно від частки зруйнованої поверхні дорожнього одягу автодороги, кг/год.×км

Частка зруйнованого полотна автодороги, $k \times 10^{-3}$ (%)	Категорія автомобільної дороги				
	I-а, I-б	II	III	IV	V
0,20	0,599	0,212	0,192	0,152	0,099
0,40	1,710	0,604	0,546	0,433	0,280
0,60	3,139	1,108	1,003	0,793	0,515
0,80	4,833	1,706	1,543	1,222	0,793
1,00	6,753	2,383	2,155	1,706	1,106
1,20	8,879	3,133	2,834	2,243	1,454
1,40	11,190	3,949	3,572	2,826	1,833
1,60	13,670	4,825	4,363	3,422	2,241
1,80	16,326	5,758	5,208	4,122	2,674
2,00	19,282	6,744	6,100	4,829	3,133
2,20		7,781	7,037	5,570	3,613
2,40		8,864	8,018	6,345	4,118
2,60		9,995	9,039	7,154	4,643
2,80		11,171	10,102	7,997	5,189
3,00		12,389	11,204	8,868	5,754

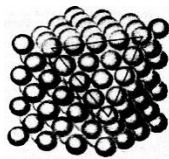


Рисунок 6 – Морфологічна модель регулярної структури максимально щільної упаковки куль у просторі

Для подальшого структурного аналізу запропонованої моделі виконаємо побудову тришарового ґратчастого агрегату шляхом накладення шарів, в яких центри куль розташовано у відповідності до “гексагональної” [6] ґратки (рис.7).



Рисунок 7 – Побудова тришарової моделі з гексагональною ґратки

Щільність ρ заповнення простору для “гексагональної” упаковки куль у просторі становить:

$$\rho = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}} \approx 0,7402 \quad (10)$$

і, відповідно, об’єм e дванадцяти тетраедричних порожнин (пористість):

$$e = (1 - \rho) = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}} \approx 0,2698; \quad (11)$$

а діаметр дезінтегрованих частинок гетерогенного заповнення об’єму при послідовному заповненні порожнин дисперсною фазою мінеральних частинок становитиме:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot e^r}{\pi \cdot (n \cdot m)^r}} = 1,241 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{e}{n \cdot m}\right)^r} \quad (12)$$

де $n = 12$ – кількість порожнин в одиниці об’єму тришарової моделі з “гексагональною” ґраткою;
 $m = 13$ – кількість мінеральних частинок дисперсної фази в порожнині дезінтегрованого матеріалу.

r – порядок диспергування дисперсної фази.

При значенні $r > 1,85$ отримуємо $d \ll 500$ мкм. Отже, частка маси $M_{дис}$ дисперсної фази від загального значення $M_{дз}$, становитиме:

$$M_{дис} = e^{r=1,85} \cdot M_{дз} \approx 0,089 \cdot M_{дз} \quad (13)$$

Таким чином відповідно до (9) і (13) визначено масу утворюваного мінерального пилу та його частку дисперговану в атмосферному повітрі, яка утворює стабільний аерозоль, залежно від конструкційних особливостей автомобільної дороги [8], інтенсивності автотранспортних потоків, динаміки річного зношування дорожнього покриття (таблиця 3).

Таблиця 3 – Маса пилових викидів та їх диспергована частка, які продукуються автотранспортними потоками, кг/год×км

Категорія автодороги	I-а, I-б	II	III	IV	V
Інтенсивність автотранспортного потоку авт/добу	> 10000	3000 – 10000	1000 – 3000	150 – 1000	< 150
Маса мінерального пилу, кг/год.×км	19,3	12,4	11,2	8,9	5,8
Маса дисперсної фази в стабільному атмосферному аерозолі, кг/год.×км	1,75	1,12	1,01	0,80	0,52

ВИСНОВКИ. Встановлено, що обсяги утворення автотранспортними потоками викидів мінерального пилу, залежно від конструкційних особливостей автомобільної дороги, інтенсивності автотранспортних потоків та динаміки річного зношування дорожнього покриття варіюють в межах 6-19 кг/год×км, а їх частка, яка утворює

Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля

повітряний аерозоль, становить 0,5-1,8 кг/год×км. Визначені обсяги викидів мінерального пилу та їх частки, які диспергуються в атмосферному повітрі у вигляді аерозолю, даватимуть змогу максимальної оптимізації заходів захисту придорожніх ландшафтів в умовах розвинутої автотранспортної мережі.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ Б.В.2.7-34-2001. Щебен для строительных работ из скальных горных пород и отходов сухого магнитного обогащения железистых кварцитов горно-обогатительных комбинатов и шахт Украины. Технические условия.
2. ДБН В.2.3-4:2007. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво.

3. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1971. – 368 с.

4. Луканин В.Н. Промышленно-транспортная экология: Учеб. для вузов / Под ред. В.Н. Луканина / В.Н. Луканин, Ю.В. Трофименко. – М.: Высш. шк., 2001. – 273 с.

5. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения / Ю.Г.Матвиенко. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.

6. Шелудченко Б.А. Механіка контактного руйнування автомобільних доріг / Б.А. Шелудченко, Л.С. Шелудченко. – Кам'янець-Подільський: В-во ТОВ Каліграф, 2016. – 66 с.

7. Шелудченко Л.С. Розроблення конструкцій газо-пилезахисних лісосмуг автодорожньої мережі / Л.С. Шелудченко. – Кам'янець-Подільський: В-во ПДАТУ, 2015. – 134 с.

THE ANALYTICAL MODELING VOLUME DISPERSING OF MINERAL SUBSTANCES BY TRANSPORT FLOW WHILE DESTRUCTION OF THE ROAD SURFACE

L. Sheludchenko, O. Ovcharuk

State agrarian and engineering university in Podilya
vul. Shevchenko, 13, Kamianets-Podilskyi, 32300, Ukraine. E-mail: seludcenkolesa@gmail.com

V. Nosko

Berezhany agrotechnical institute
vul. Academichna, 20, Berezhany, 47501, Ukraine. E-mail: noskovasil@ukr.net

Purpose. To develop method of the analytical modeling volume dispersing of mineral substances by transport flow while destruction of the road surface. **Methodology.** Developed the analytical model of cavern road surface based on analysis of character destruction processes by road clothes and conducted the analytical investigation of volumes formation disintegrated mineral substances depending on the level of its destruction. The main components are dispersed in question is soot, mineral dust, as a product of pavement deterioration, rubber crumb, metal oxides, asbestos particles of substances used in the facilities of vehicles. **Results.** It present the results of graphic-analytical determining volumes creation of dispersed mineral materials in the contact zone “road-mover vehicle”, which caused by deterioration and destruction materials of pavement construction, for highways categories 1-a, 1-b, 2, 3, 4 and 5, as a result of fretting-wearing, pitting damage, formation caverns and macrocracks. **Practical value.** Defined volumes of emissions the mineral dust and their shares, which are dispersed in the atmospheric air, make it possible to optimize protection measures of roadside landscapes in conditions by developed transport network and to ensure their environmental safety. *References 7, tables 3, figures 7.*

Key words: road, mineral materials, road surface, cavern.

REFERENCES

1. National standards of Ukraine 2.7-34-2001. Crushed stone for construction work from rocky rocks and wastes of dry magnetic enrichment of ferruginous quartzites of mining and processing plants and mines of Ukraine. Technical conditions.
2. National buildings standards of Ukraine 2.3-4:2007. Transport facilities. Highways. Part I. Design. Part II. Construction.
3. Goldstein, M.N. (1971) Mechanical properties of soils, Publishing House of Literature on Construction, Moscow, Russia.

4. Lukanin, V.N. (2001) Industrial-transport ecology: Textbook. For universities, Higher education, Moscow, Russia.
5. Matvienko, Y.G. (2006) Models and criteria for fracture mechanics, Fizmatlit, Moscow, Russia.
6. Sheludchenko, B.A. and Sheludchenko L.S. (2016) Mechanics pin destruction of roads, Calligraphers, Kamianets-Podilskyi, Ukraine.
7. Sheludchenko, L.S. (2015) The development of gas-dust structures belts road network, SAUP, Kamianets-Podilski, Ukraine.