

Ю.Д. Абрашкевич, д-р.т.н., проф.;  
Л.Є. Пелевін, к.т.н, проф;  
В.П. Рашківський, к.т.н, доцент;  
Д.А. Соловей, к.т.н. (КНУБА, Київ)

## КІНЕМАТИЧНІ ТА СИЛОВІ ПАРАМЕТРИ МАШИН З АБРАЗИВНИМИ АРМОВАНИМИ КРУГАМИ

*АНОТАЦІЯ. В даній роботі досліджено вплив кінематичних та силових параметрів машин з абразивними армованими кругами на процес різання будівельних матеріалів з різними фізичними характеристиками*

*Ключові слова: абразивні круги, кінематичні та силові параметри, монтажні роботи.*

*АННОТАЦИЯ. В данной работе исследовано влияние кинематических и силовых параметров машин с абразивными армированными кругами на процесс резания строительных материалов с разными физическими характеристиками*

*Ключевые слова: абразивные круги, кинематические и силовые параметры, монтажные работы.*

*SUMMARY. We study the influence of kinematical and force parameters of machines with reinforced abrasive circles in the process of cutting building materials with different physical characteristics*

*Key words: abrasive circles, kinematical and force parameters, installation works.*

### Вступ

На будівельно-монтажних роботах постійно розширюється застосування абразивних армованих кругів. Паралельно зі створенням нових типів абразивних армованих кругів, розробляються машини для їх ефективного використання. При створенні машин, призначених для обробки матеріалів з різними фізико-механічними властивостями, необхідно визначити силові параметри, в першу чергу потужність привода машини, яка, в основному, залежить від режимів роботи і довжини дуги контакту між кругом і розрізуваним виробом. Маса машин, що використовуються на будівельно-монтажних роботах, а, відповідно, потужність їх приводу повинні бути, по можливості, мінімальними, та одночасно забезпечувати продуктивну роботу і економну витрату абразивного інструменту. В процесі розробки машин, досліджувалися різні способи різання [1, 2], що визначають їх кінематику. У табл.1 приведені аналітичні залежності для визначення довжин дуг контакту при різанні труб і профільного матеріалу при раціональному розташуванні круга і розрізуваного виробу. Приведені залежності отримані при різанні найпоширенішим методом – врізан-

ням, тобто заготовка розрізається по контуру за один прохід.

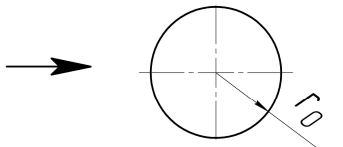
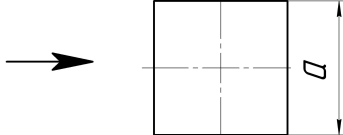
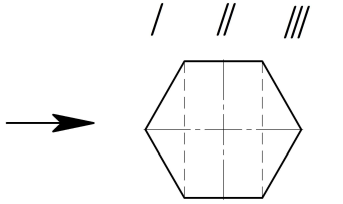

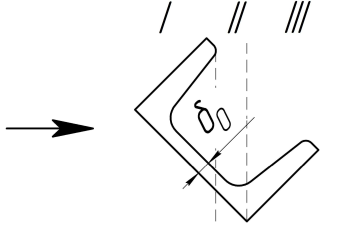
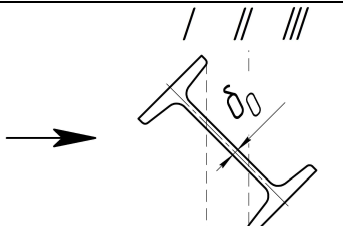
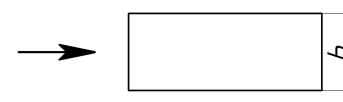
При різанні методом обкатування, тобто коли круг переміщується навколо труби або заготовки, а також у випадку, якщо він коливається відносно розрізуваного виробу, довжина дуги контакту приблизно в два рази менше, ніж при врізуванні. Проте, ці методи практичного розповсюдження на монтажних роботах не одержали.

На будівельно-монтажних роботах застосовуються круги радіусом  $R_0$  до 250 мм і товщиною від 1,5 до 5 мм, якими обробляються сталеві труби діаметром до 159 мм з різною товщиною стінок, профільний метал різної конфігурації, а також неметалічні будівельні матеріали (камінь, полімерні труби).

**Метою** даної роботи є отримання узагальнюючих аналітичних залежностей, що дозволяють визначити силові параметри при різанні будівельних елементів, абразивними армованими кругами різних типів.

Таблиця 1

Аналітичні вирази для визначення довжин дуг контакту

Розрізуваний матеріал	Схема різання	Аналітичний вираз для визначення довжини дуги контакту
Сталь кругла повнотіла, пруток з радіусом $R_o$		$\tilde{l}_k = 2R_o \arccos \left[ 1 - \frac{2r_o h_o - h_o^2}{2R_o (R_o + r_o - h_o)} \right]$
Квадрат		$\tilde{l}_k = 2R_o \arcsin \frac{a}{2R_o}$
Шестигранник		$\tilde{l}_{k1} = 2R_o \arccos \frac{h_o \sqrt{3}}{R_o}$ $\tilde{l}_{k2}^{\max} = 2R_o \arcsin \frac{a \sqrt{3}}{2R_o}$ $\tilde{l}_{k3} = 2R_o \arcsin \frac{2a - h_o}{R_o}$
Кутик		$\tilde{l}_k = \delta_o \sqrt{2}$
Швелер		$\tilde{l}_{k1} = 2\delta_o \sqrt{2}; \tilde{l}_{k2} = \tilde{l}_{k3} = \delta_o \sqrt{2}$
Двотавр		$\tilde{l}_{k1} = \tilde{l}_{k3} = 2\delta_o \sqrt{2}; \tilde{l}_{k2} = \delta_o \sqrt{2}$
Гірська порода		$\tilde{l}_k = R_o \arccos \left( 1 - \frac{h}{R_o} \right)$ $h$ – глибина різання, м.

**Виклад основного матеріалу**

Дослідження проводилися в КНУБА на експериментальному стенді, що дозволяє виконувати різання на робочих швидкостях від 50 до 80 м/с і швидкостях подач від 0,2 до 1,25 м/хв. Вимірювання зусиль різання (тангенціального  $P_Z$  і нормального

$P_Y$ ) виконувалось за допомогою тензометричного стола. Різанням підлягали труби з вуглецевої сталі діаметром від 32 до 159 мм з товщиною стінок від 2,5 до 6 мм; сталь кругла діаметром від 10 до 30 мм; сталь квадратна товщиною від 10 до 30 мм; сталь шестигранна зі стороною від 10 до 30 мм; сталь прокатна кутова рівнополочна з довжиною полки від 20 до 75 мм і

товщиною від 4 до 7 мм; швелери №№ від 8 до 20; балки двотаврові №№ від 10 до 20. Різання підлягали труби і прутки з легированих сталей 1Х17Н2; Х18Н10Т; 4Х13; 20Х; 40Х, Х18Н17МА різних розмірів, пластмасові труби з вініласту та поліетилену низької і високої щільності діаметром від 63 до 160 мм і товщиною стінок від 4 до 12 мм, а також шамотна цеглина, арктиський туф, інкерманський і бодракський вапняк, моговський туф, красноводський вапняк і туф маяковський. Різання цих будівельних матеріалів міцністю від 70 до 250 кг/см<sup>2</sup> виконувалось із знепилюванням водою.

В процесі досліджень використовувалися відрізки круги 115х2х22 мм, 125х2х22 мм, 180х2,5х22 мм, 180х3х22 мм, 230х2,5х22 мм, 230х3,0х22 мм, 300х3х32 мм, 400х4х32 мм, 500х5х32 мм. Дослідження проводилися методом планування багатофакторних експериментів. В результаті попередніх досліджень було встановлено [4, 5], що силові параметри, в основному, залежать від довжини дуги контакту між кругом і розрізуваним виробом, режимів роботи і фізико-механічних характеристик досліджуваних матеріалів. Обробка експериментальних даних здійснювалася за відомими методиками [6]. Достовірність отриманих результатів – 95%.

Розглянемо різання матеріалів з вуглецевих сталей. Основні фактори, які визначають величини зусилля різання – робоча швидкість  $V_p$ , ріжуча здатність  $Q$ , довжина дуги контакту  $L$ , інтервали варіювання, верхній і нижній рівні цих факторів, приведені в табл. 2.

Для визначення необхідного числа паралельних дослідів  $m$  ставилися експерименти в “нульовій” точці, відповідній основному рівню факторів. Результати вимі-

рювань показали, що в межах точності експериментів питомі величини зусиль різання  $\frac{P_z}{h}, \frac{P_y}{h}$  (де  $h$  – висота круга) не залежать від конфігурації розрізуваних виробів і визначаються:

$$\frac{P_y}{h} = 7,61; \quad \sigma_y = 12,29 \cdot 10^{-2}, \quad (1)$$

$$\frac{P_z}{h} = 3,42; \quad \sigma_z = 5,8 \cdot 10^{-2}, \quad (2)$$

$$m = 8,$$

де  $\sigma_y, \sigma_z$  – відповідні дисперсії;  $m$  – число паралельних дослідів.

В якості моделі, що описує зміни питомих силових параметрів різання, були вибрані наступні поліноми:

$$\begin{aligned} \frac{P_z}{h} = & a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i \cdot x_i + \sum_{i,j=1}^3 a_{i,j} x_i \cdot x_j + \\ & + \sum_{i,j,k=1}^3 a_{i,j,k} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_k; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_y}{h} = & e_0 + \sum_{i=1}^3 e_i \cdot x_i + \sum_{i,j=1}^3 e_{i,j} x_i \cdot x_j + \\ & + \sum_{i,j,k=1}^3 e_{i,j,k} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_k, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $x_1, x_2, x_3$  – безрозмірні значення факторів;  $a_0, a_1, \dots, a_{123}, b_0, b_1, \dots, b_{123}$  – коефіцієнти лінійної моделі.

Перехід до безрозмірних значень факторів здійснюється за залежностями аналогічними приведеним:

$$X_i = \frac{V_p - V_{p_0}}{I}, \quad (5)$$

де  $V_{p_0}$  – основний рівень фактора;  $I$  – інтервал варіювання.

Таблиця 2

Рівні та інтервали варіювання факторів

Показники	Фактори, що вивчаються		
	$V_p$ , м/с	$Q$ , см <sup>2</sup> /с	$L$ , мм
Верхній рівень	80	0,8	66
Основний рівень	65	0,525	48
Нижній рівень	50	0,25	34
Інтервал варіювання	15	0,275	16

Для визначення коефіцієнтів моделі (3, 4) проводився повний експеримент чинника типу 23 [7]. Результати експерименту приведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати дослідів за визначенням силових параметрів

Значення закодованих змінних	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_4$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$\frac{P_z}{h}$	$\Delta^2(P_z)$	$\frac{P_y}{h}$	$\Delta^2(P_y)$
Дослід 1	+	+	+	+	+	+	+	+	4,23	0,01584	8,5	0,01
2	+	+	-	+	-	+	-	-	2,32	0,00292	4,85	0,0225
3	+	-	-	+	+	-	-	+	3,15	0,00332	7,5	0,01
4	+	-	-	-	+	+	+	-	2,12	0,0064	5,16	0,0256
5	+	+	+	-	+	-	-	-	2,31	0,0108	4,69	0,0009
6	+	+	-	-	-	-	+	+	1,41	0,0284	4,35	0,0049
7	+	-	+	-	-	+	-	+	3,36	0,00088	5,57	0,0049
8	+	-	+	+	-	-	+	-	6,35	0,00408	16,3	0,01

Однорідність дисперсій перевірялася за критерієм Кохрена [ 7].

Математична модель, що описує питомі значення силових параметрів процесу різання, прийме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{P_z}{h} = & 3,16 - 0,59 \cdot X_1 + 0,9 \cdot X_2 + \\ & + 0,85 \cdot X_3 - 0,21 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ & - 0,15 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,37 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\ & - 0,12 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_y}{h} = & 7,12 - 1,53 \cdot X_1 + 1,66 \cdot X_2 + \\ & + 2,16 \cdot X_3 - 0,66 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ & - 1,08 \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,45 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\ & - 0,62 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \end{aligned} \quad (7)$$

Значущість коефіцієнтів моделі перевірялася за критерієм Стьюдента [7]. Встановлено, що всі коефіцієнти значущі. Адекватність моделі перевірялася із залученням результатів експериментів в “нульовій” точці за критерієм Фішера [7]. Модель є адекватною.

Таблиця 4

Результати експериментів за визначенням силових параметрів різання

Значення закодованих змінних X	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_4$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$\frac{P_z}{h}$	$\Delta^2(P_z)$	$\frac{P_y}{h}$	$\Delta^2(P_y)$
Дослід 1	+	+	+	+	+	+	+	+	4,75	0,016	12,5	0,01
2	+	+	-	+	-	+	-	-	1,32	0,003	5,56	0,01
3	+	-	-	+	+	-	-	+	2,11	0,003	7,5	0,01
4	+	-	-	-	+	+	+	-	1,09	0,006	2,89	0,025
5	+	+	+	-	+	-	-	-	2,45	0,010	6,44	0,011
6	+	+	-	-	-	-	+	+	0,68	0,011	1,76	0,005
7	+	-	+	-	-	+	-	+	3,92	0,010	10,31	0,004
8	+	-	+	+	-	-	+	-	7,6	0,004	20,01	0,009

Перейдемо до різання матеріалів з легваної сталі. З отриманих результатів за експериментальним визначенням силових параметрів різання з досліджуваних приведені лише дані, що відносяться до найміцнішої сталі 1X17H2. Інтервали варіювання, нижній, основний і верхній рівні факторів приведені в табл. 2. Експерименти в “нульовий” точці показали наступні значення питомих зусиль та їхніх дисперсій, тобто

$$\frac{P_y}{h} = 7,58; \quad \sigma_y^2 = 5,6 \cdot 10^{-2}, \quad (8)$$

$$\frac{P_z}{h} = 2,83; \quad \sigma_z^2 = 11,83 \cdot 10^{-2}; \quad (9)$$

$$m = 8.$$

Математична модель вибрана у вигляді залежностей (3, 4).

Для визначення коефіцієнтів моделі також проводився повний експеримент фактора типу  $2^3$ . Результати експериментів приведені в табл. 4.

Після перевірки однорідності дисперсії, значущості коефіцієнтів і адекватності моделі можна стверджувати, що математичною моделлю, що описує зміни питомих зусиль різання у вказаному діапазоні зміни факторів, є наступні вирази:

$$\begin{aligned} \frac{P_z}{h} = & 3,0 - 0,7 \cdot X_1 + 1,7 \cdot X_2 + \\ & + 0,95 \cdot X_3 - 0,39 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ & - 0,22 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,54 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\ & - 0,22 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_y}{h} = & 7,87 - 1,82 \cdot X_1 + 4,45 \cdot X_2 + \\ & + 2,51 \cdot X_3 - 1,03 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ & - 0,58 \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,42 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\ & - 0,57 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Розглянемо різання пластмас абразивними армованими кругами.

Дослідження, проведені в роботі [8] за визначенням впливу режимів роботи на якість поверхні різа, дозволили визначити рівні та інтервали варіювання факторів, за яких поверхня різа буде задовільною (табл.5).

Після проведення експериментів “нульової” точки для визначення необхідного числа паралельних дослідів, одержані наступні результати:

$$\frac{P_y''}{h} = 3,25; \quad \sigma_y^2 = 27,4 \cdot 10^{-2}, \quad (12)$$

Таблиця 5

Рівні та інтервали варіювання чинників

Фактори	$V_{P1}$ , м/с	$Q$ , см <sup>2</sup> /с	$L$ , мм
Верхній рівень	80	0,8	96
Основний рівень	65	0,525	66
Нижній рівень	50	0,25	36
Інтервали варіювання	15	0,275	30

Таблиця 6

Результати експериментів за визначенням силових параметрів

Фактори	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_4$	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	$\frac{P_z}{h}$	$\Delta^2(P_z)$	$\frac{P_y}{h}$	$\Delta^2(P_y)$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	3,3	0,01	6,52	0,009
2	+	+	-	+	-	+	-	-	0,54	0,009	1,188	0,02
3	+	-	-	+	+	-	-	+	0,86	0,01	1,7	0,01
4	+	-	-	-	+	+	+	-	0,24	0,009	0,66	0,01
5	+	+	+	-	+	-	-	-	0,64	0,02	1,58	0,09
6	+	+	-	-	-	-	+	+	0,16	0,01	0,34	0,01
7	+	-	+	-	-	+	-	+	0,9	0,01	2,4	0,009
8	+	-	+	+	-	-	+	-	5,3	0,009	12,0	0,01

$$\frac{P''_z}{h} = 1,46; \quad \sigma_z^2 = 5,1 \cdot 10^{-2}, \quad (13)$$

$$m = 8.$$

В якості математичної моделі для визначення питомих зусиль різання вибрано багаточлен першого ступеня (3, 4). Для визначення коефіцієнтів регресії проводився повний експеримент факторний типу  $2^3$ . Результати експериментальних даних приведені в табл. 6.

Після перевірки однорідності дисперсії, значущості коефіцієнтів регресії і адекватності моделей, одержані наступні аналітичні вирази:

$$\begin{aligned} \frac{P''_y}{h} = & 3,3 - 0,89 \cdot X_1 + 2,33 \cdot X_2 + \\ & + 2,05 \cdot X_3 - 0,68 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ & - 0,61 \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,58 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\ & - 0,59 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{P''_z}{h} = & 1,53 - 0,3 \cdot X_1 + 0,95 \cdot X_2 + \\ & + 1,04 \cdot X_3 - 0,22 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ & - 0,21 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,67 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\ & - 0,18 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \end{aligned} \quad (15)$$

Перейдемо до розгляду різання каменя. Інтервали вирівнювання і рівні факторів приведені в таблиці 7.

Для визначення необхідної кількості паралельних дослідів проводився експеримент в “нульовій” точці факторного прос-

тору, та, зважаючи на складність підбору породи з міцністю  $\sigma_0 = 155 \text{ кг/см}^2$ , різався бодракський вапняк ( $\sigma = 130 \text{ кг/см}^2$ ). Крім того, довжина дуги контакту  $L$ , в даному випадку, замінена глибиною різання  $H$ .

Результати експериментів в “нульовій” точці рівні:

$$\frac{P'''_y}{h} = 5,9; \quad \sigma_y''' = 17,64 \cdot 10^{-2}, \quad (16)$$

$$\frac{P'''_z}{h} = 14,7; \quad \sigma_z''' = 10,7 \cdot 10^{-2}, \quad (17)$$

$$m = 8.$$

Для визначення коефіцієнтів лінійної регресії необхідно проводити повний факторний експеримент типу  $2^4$ . У даному випадку доцільнішим виявилось використання “внутрішньо-лінійної форми” [5], для запису якої немає необхідності переходити до кодованих значень факторів. Тому аналітичний вираз для зусиль різання матиме вигляд:

$$y_i = d_0 + \sum_{i=1}^n d_i x_i + \sum_{ij=1}^n d_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{ijk=1}^n d_{ijk} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_k + \quad (18)$$

$$+ \sum_{ijks=1}^n d_{ijks} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_k \cdot x_s;$$

$$P_i = \xi_i = V_i^{n_i} \cdot V_{рез}^{\theta_i} \cdot \sigma_e^{de_i} H^{\psi_i}. \quad (19)$$

Таблиця 7

Рівні та інтервали варіювання факторів

Фактор	Нижній рівень	Кодоване значення	Основний рівень (нульовий)	Кодоване значення	Верхній рівень	Кодоване значення	Інтервал варіювань
Робоча швидкість $V_p, \text{ м/с}$	30	-1	55	0	80	+1	25
Швидкість подачі $V_{под}, \text{ м/хв.}$	0,2	-1	0,9	0	1,6	+1	0,7
Глибина різання $H, \text{ см}$	2	-1	6	0	10	+1	4
Міцність породи $\sigma, \text{ кг/см}^2$	70	-1	155	0	240	+1	85

Для визначення 4-х коефіцієнтів регресії необхідне проведення лише 4-х дослідів. Зі всього плану типу  $2^4$ , якщо скористатись таблицею випадкових чисел, вибираємо 4 точки, в яких проводилося по 8 паралельних дослідів. Результати експериментів приведені в табл. 8.

### Література

1. Сотников Г.А. Рациональное применение абразивных армированных кругов. Монтажные и специальные работы в строительстве. М., 1981, вып. 9, с. 21-24.
2. Мифлинг Д.М., Семенов Е.Б., Шор Г.М. Приборы для исследования силовых параметров при шлифовании и резании камня. В сб.: Горный породоразрушающий инструмент. К., «Техника», 1970.

Таблица 8

### Визначення силових параметрів при різанні каменя

Комбінація факторів	$P_y$ , кг	$\sigma_y^2 \cdot 10^{-2}$	$P_z$ , кг	$\sigma_z^2 \cdot 10^{-2}$
80 м/с, 1,6 м/хв; 2 см, 240 кг/см <sup>2</sup>	15,7	9,8	5,8	10,5
30 м/с, 1,6 м/хв; 2 см, 240 кг/см <sup>2</sup>	37,9	9,7	14	11,2
80 м/с, 1,6 м/хв; 10 см, 70 кг/см <sup>2</sup>	3,9	9,6	1,5	10,9
30 м/с, 0,2 м/хв; 2 см, 70 кг/см <sup>2</sup>	1,9	9,3	0,8	11,4

### Висновки

Отримані дані за визначенням силових параметрів різання можуть бути використані при розробці машин для різання: вогнетривких матеріалів, пластмасових і сталевих труб, металопродукту.

В результаті обробки експериментальних даних, перевірки однорідності дисперсій, значущості коефіцієнтів і адекватності моделі, одержані наступні вирази для аналітичного визначення питомих зусиль різання.

$$\frac{P_z^m}{h} = 35,5 \cdot 10^{-2} \frac{v_n^{0,75}}{v_p} \sigma H^{0,75}, \quad (20)$$

$$\frac{P_y^m}{h} = 13,5 \cdot 10^{-2} \frac{v_n^{0,75}}{v_p} \sigma H^{0,75}. \quad (21)$$

3. Налимов В.В. Применение статистических методов при анализе вещества. М., Наука, 1965, с. 167.
4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., Наука, 1976, с. 278.
5. Львовский Г.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М. Высшая школа, 1082, с. 224.

Рецензент: А.В. Фомін, к.т.н, проф.  
(КНУБА, Київ)

Отримано: 22.11.2011 р.