

УДК 622.2

**О. Терентьєв, докт. техн. наук;  
А. Клещов; П. Гонтар**

*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»*

## **ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ РУЙНУВАННЯ КРИСТАЛІЧНИХ СТРУКТУР ПОТОКАМИ ІНДУКТИВНОЇ ПЛАЗМИ**

**Резюме.** В якості зразків кристалічних структур для проведення експерименту обрано гематит, кварц, кальцит, магнезит. Забезпечення адекватності результатів експериментальних досліджень руйнування гірських порід керованим електротермічним впливом індуктивної плазми досягається за рахунок обрання змінної стану породи та параметрів, що впливатимуть на неї при руйнуванні її керованим електротермічним впливом; розроблення схеми стенда; перевірки адекватності моделі експериментальних досліджень. Планування експериментальних досліджень руйнування кристалічних структур керованим електротермічним впливом індуктивної плазми виконано за ортогональним центральним композиційним плануванням. Запропоновано матрицю експерименту, що задовольняє затвердженій моделі. Спроектовано електричну схему стенда експериментальних досліджень. Адекватність моделі підтверджена за критерієм Кохрена.

**Ключові слова:** експеримент, модель досліджень, керований електротермічний вплив, індуктивна плазма.

**O. Terentiev, A. Kleshchov, P. Gontar**

## **EXPERIMENT PLANNING OF CRYSTALLINE STRUCTURES FRACTURE BY INDUCTIVE PLASMA FLOWS**

**Summary.** The article analyses modern fracture theories considering Kausch, Ragel, Narisava and others to be the founders. It determines common shortcomings of known researches and suggests solving them on account of statistic planning of crystalline structures fracture by inductive plasma flows. The use of methods and models of experiment planning allows determining the error of mathematical model and judging about its validity. The variable of rock state and parameters that influence electrothermal rock fracturing are selected. The order of experiment conducting and intervals of factors variation are determined that define the course of research. This article suggests hematite, quartz, calcite and magnesite as rock specimens for conducting the experiment. Valid results of experimental research of inductive plasma by the directed thermal-electric effect on rock failure are provided due to: selection of rock state variable and parameters that will be used during directed thermal-electric rock failure; design of test bench scheme; verification of experimental research model validity. In order to provide valid results of experimental research of inductive plasma by the directed thermal-electric effect on rock failure the orthogonal central composition planning is chosen. In addition, this article suggests the experiment matrix that complies with the approved research model. The electric scheme of experimental research test bench is designed. The experimental test bench differs from the available ones because it does not have capacitive elements. The inductive plasma fracturing plant (IPFP) is planned to be installed in mining industry enterprises. Results validity of experimental research of rock fracture by directed electrothermal influence of inductive plasma is provided. Variation levels and range of main factors (crystalline structure, current and discharge circuit inductance) are chosen. The model validity is verified according to the Cochran criterion. In order to prevent a priori ignorance the entropy of results is determined. Statistical distribution of specific energy intensity of crystalline structures fracturing in conditions of current variation and discharge circuit inductance is determined.

**Key words:** experiment, research model, directed thermal-electric effect, inductive plasma.

**Постановка проблеми.** У процесі вимірювань та опрацювання, виникають похибки через неточність виміряних експериментальних даних. Встановлення порядку проведення експерименту та інтервалів варіювання чинників визначає хід дослідження. Застосування методів та моделей планування експерименту дозволяє визначити похибку математичної моделі й робити висновок про її адекватність. Якщо точність моделі виявляється

недостатньою, то застосування методів планування експерименту дозволяє модернізувати математичну модель з проведенням додаткових дослідів без втрати попередньої інформації та з мінімальними матеріальними витратами [1]. Зниження витрат при руйнуванні гірських порід є актуальним завданням, відповідно до статті 7 «Гірничого закону України» № 1193-VII (1193-18) від 09.04.2014 р. [2] та пункту 2.4 «Галузевої програми енергоефективності та енергозбереження на період до 2017 р.» № 152 від 25.02.2009 р [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналізуючи сучасні теорії руйнування, до основоположників можна віднести Kausch [4], Рейгеля [5], I. Narisava [6] та інших. Згідно з їхніми дослідженнями потенційна енергія кристалічної решітки розраховується через зсув атомів з положення рівноваги, сили взаємодії між атомами й енергію вільних електронів. Це дає можливість перейти від класичних до молекулярно-хвильових теорій руйнувань. Вони виражають взаємодію структур гірських порід як сукупність сил пластичності й пружності і є сталою фізико-механічних констант середовища, яка руйнується. Недоліком розглянутих теорій є сталість фізико-механічних констант, які не піддаються акомодатії до різних умов роботи енергетичних джерел і зміні станів атомарних структур середовища. Це не дає змоги визначення залежності фізико-механічних параметрів кристалічних структур із енергоємністю руйнування гірських порід електротермічним впливом індуктивної плазми.

**Мета роботи** – забезпечення адекватності результатів експериментальних досліджень руйнування гірських порід керованим електротермічним впливом потоків індуктивної плазми. Для досягнення мети **поставлені** такі **задачі**:

- обрати змінну стану породи та параметри, що впливатимуть на неї при руйнуванні її керованим електротермічним впливом;
- розробити електричну схему стенда;
- перевірити адекватність моделі експериментальних досліджень.

**Результати дослідження.** Програму та методику досліджень розроблено відповідно до [1]. Досліджується реакція кристалічних структур на керований електротермічний вплив потоками індуктивної плазми. В якості зразків для проведення експериментальних досліджень прийнято гематит, кварц, кальцит, магнезит. Магнезит обрано через поширеність його використання у виробництві будівельних матеріалів, кераміки, скла тощо [7]. Гематит є одним із основних рудних мінералів [8], тому ослаблення його структур потоками індуктивної плазми є актуальним. Кремій є другим за поширеністю елементом на Землі, що входить до кварцових структур [9]. Кальцит є одним із найрозповсюдженіших мінералів на Землі [10].

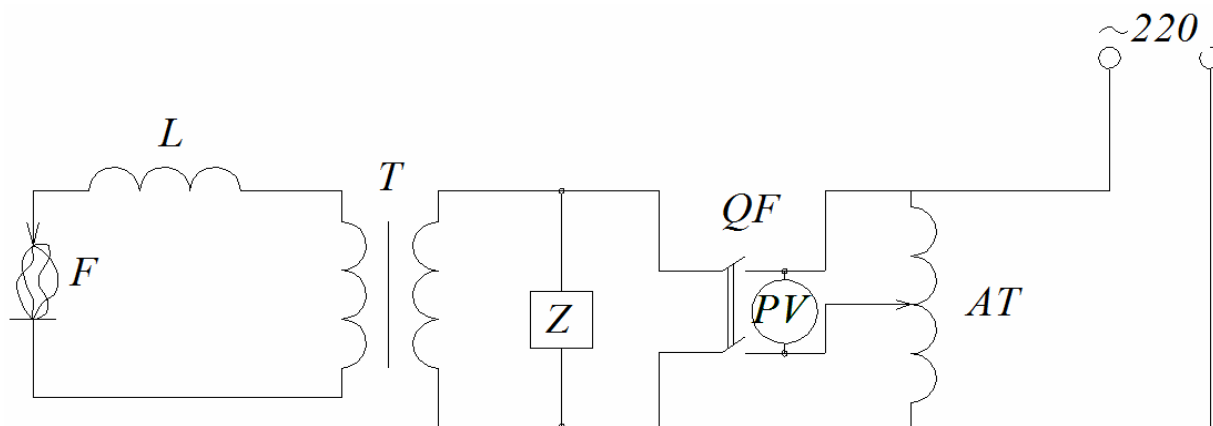
Установка руйнування індуктивною плазмою (РІП) планується до впровадження на підприємствах гірничої галузі. Тому доцільним є визначення залежності питомої енергоємності руйнування обраних зразків від зміни технологічних параметрів (струму та індуктивності розрядного контуру) установки електротермічного руйнування потоками індуктивної плазми.

На питому енергоємність руйнування  $A$ , кВт·год/т, при руйнуванні потоками і впливають такі групи чинників: зразків (кристалічна структура, міцність, параметр кристалічних решіток), установки руйнування індуктивною плазмою (індуктивність та струм розрядного контуру), потоків індуктивної плазми (радіус, температура, концентрація та частота власних коливань потоків плазмового каналу). Основні вимоги до основних чинників дослідження – керованість (необхідно врахувати чинники об'єкта досліджень, які можна регулювати) та однозначність (чинники не повинні залежати один від одного). Цим вимогам відповідають чинники, обрані як головні:  $x_1$  – кристалічна структура зразків;  $x_2$  – струм розрядного контуру установки руйнування індуктивною плазмою;  $x_3$  – індуктивність розрядного контуру установки руйнування індуктивною плазмою.

Для проведення експерименту виготовлено експериментальний стенд руйнування потоками індуктивної плазми. Установка має такі переваги:

- мінімум елементів, що зменшує кількість вузлів;
- використання змінного струму не передбачає застосування випрямлячів;

- за необхідності можливість використання постійної напруги на виході;
  - можливість варіювання рівнів напруги шляхом зміни відстані між розрядниками, підбираючи пробивну напругу;
  - за звуком пробивання дуги можна визначити працездатність контуру схеми.
- Схема експериментального стенду наведена на рис.1.



**Рисунок 1.** Електрична схема стенда експериментальних досліджень системи РІП, де F – розрядник; L – індуктивність; T – високовольний трансформатор; Z – фільтр; QF – вимикач; PV – вольтметр; AT – автотрансформатор

**Figure 1.** Electric scheme of experimental test bench of IPFP system, where F – discharger; L – inductance; T – high-voltage transformer; Z – filter; QF – switch; PV – voltmeter; AT – autotransformer

Від мережі 220 В живиться автотрансформатор AT, вихідна напруга якого регулюється від 0 до 127 В. Фільтр Z згладжує синусоїду напруги і забезпечує плавність пуску та надійність роботи високовольного трансформатора T, який налаштований на коефіцієнт перетворення 1181 – максимальне значення для плавного регулювання напруги автотрансформатором. Напруга на виході T через дросель L, який слугує для створення енергетичного колапсу, пробиває розрядника F плазмовим каналом. Утворюється коливальний контур. Котушка індуктивності складається з 2217 витків мідного провoda виток до витка, діаметром 0,455 мм. Обрано мідний провід, бо його характеристики (теплопровідність, струмопровідність, стійкість до механічних впливів) вищі за характеристики алюмінію [11].

Для безпеки обслуговуючого персоналу експериментальний стенд знаходиться у клітці Фарадея (заземлена сітка, що перешкоджає доступу до установки). Для запобігання нещасних випадків корпус високовольного трансформатора заземлений. Роботи виконують на гумових килимках у діелектричних рукавицях із заземленими штангами довжиною не менше 1,5 м.

Обрано рівні та інтервали варіювання головних чинників (кристалічна структура, струм та індуктивність розрядного контуру) і зведено до табл.1. Рандомізацію дослідів проведено за допомогою генератора випадкових чисел, табл.2.

Відповідно до матриці планування досліджено залежність питомої енергоємності руйнування A (кВт·год/т) після руйнування потоками індуктивної плазми залежно від струму I (A) та індуктивності L (мкГн) розрядного контуру для кристалічних структур гематиту, кварцу, кальциту та магнетиту:  $A=f(I, L)$ .

Матриця планування експерименту в явному вигляді зведена до табл.2.

**Таблиця 1**

## Рівні та інтервали варіювання чинників

Чинник	Рівні			Інтервал варіювання	x <sub>1</sub> – кристалічна структура
	Нижній (-1)	Нульовий (0)	Верхній (+1)		
1	2	3	4	5	6
x <sub>2</sub> – струм розрядного контуру, А	8	9	10	1	Гематит
x <sub>3</sub> – індуктивність контуру схеми, мкГн	11,92	23,84	35,76	11,92	
x <sub>2</sub> – струм розрядного контуру, А	8	9	10	1	Кварц
x <sub>3</sub> – індуктивність контуру схеми, мкГн	11,92	23,84	35,76	11,92	Кварц
x <sub>2</sub> – струм розрядного контуру, А	8	9	10	1	Кальцит
x <sub>3</sub> – індуктивність контуру схеми, мкГн	11,92	23,84	35,76	11,92	
x <sub>2</sub> – струм розрядного контуру, А	8	9	10	1	Магnezит
x <sub>3</sub> – індуктивність контуру схеми, мкГн	11,92	23,84	35,76	11,92	

*x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub> – головні чинники планування експерименту.*

Таблиця 2

Матриця планування експерименту в явному вигляді

Порядок проведення досліджу	№ досліджу	x <sub>0</sub>	Планування		
			x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>
			Кристалічна структура	Струм розрядного контуру, А	Індуктивність розрядного контуру, мкГн
1-й блок					
1	6	+1	Гематит	8	11,92
2	13	+1		9	11,92
3	3	+1		10	11,92
4	20	+1		8	23,84
5	12	+1		8	35,76
2-й блок					
6	15	+1	Кварц	8	11,92
7	5	+1		9	11,92
8	9	+1		10	11,92
9	2	+1		8	23,84
10	16	+1		8	35,76
3-й блок					
11	19	+1	Кальцит	8	11,92
12	4	+1		9	11,92
13	14	+1		10	11,92
14	1	+1		8	23,84
15	10	+1		8	35,76
4-й блок					
16	11	+1	Магнезит	8	11,92
17	7	+1		9	11,92
18	17	+1		10	11,92
19	8	+1		8	23,84
20	18	+1		8	35,76

За результатами дослідів отримано дві залежності для чотирьох кристалічних структур ( $A=f(I)$ ,  $A=f(L)$ ). Експеримент виконано відповідно до табл.2.5. Загальна кількість кривих у декартовій системі координат (8 шт.) повністю характеризує тривимірний простір залежності:  $A=f(I, L)$ .

Визначено, що головні чинники впливу на питому енергоємність руйнування кристалічних структур взаємопов'язані. У процесі руйнування кристалічних структур потоками індуктивної плазми кристалічні структури будуть змінюватися нелінійно у часі й просторі та знижуватиметься питома енергоємність руйнування у степеневій залежності. Через зміну кристалічних структур від впливу потоків індуктивної плазми при варіації струму та індуктивності розрядного контуру питома енергоємність руйнування знижуватиметься за геометричним розподілом, бо залежності головних чинників мають степеневі характери.

За результатами плану сформовано поліном [12]

$$\hat{Y} = b_0' + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_4 \cdot (x_1^2 - a) + b_5 \cdot (x_2^2 - a) + b_6 \cdot (x_3^2 - a), \quad (1)$$

де

$$b_0' = b_0 - b_4 \cdot a + b_5 \cdot a - b_6 \cdot a. \quad (2)$$

Коефіцієнти поліному [12]

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^n x_{iU} \cdot y_i}{\sum_{U=1}^n x_{iU}^2}, \quad (3)$$

$$b_{iU} = \frac{\sum_{U=1}^n (x_{iU} \cdot x_{jU}) \cdot y_j}{\sum_{U=1}^n (x_{iU} \cdot x_{jU})^2}, \quad (4)$$

$$b_{iUj} = \frac{\sum_{U=1}^n (x_{iU} \cdot x_{jU} \cdot x_{aU}) \cdot y_j}{\sum_{U=1}^n (x_{i1U} \cdot x_{i2U} \cdot x_{aU})^2}, \quad (5)$$

де  $i, j$  – номер строки та стовпця в матриці планування, відповідно, в. о.;

$U$  – номер строки, в.о.

Коефіцієнти полінома  $b$  визначено незалежно одне від іншого. Суми в знаменниках різні для лінійних та квадратичних ефектів і взаємодій.

Значення коефіцієнтів полінома зведені до табл.3.

**Таблиця 3**

Коефіцієнти полінома

Коефіцієнти полінома							
$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$
4.153	-0.3	-2.407	0.451	-0.259	1.531	0.801	-2.154

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії [12]

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_{\text{восп}}^2}{\sum_{U=1}^n x_{ij}^2}, \quad (6)$$

$$S'_{bii}{}^2 = \frac{S^2_{\text{восп}}}{\sum_{U=1}^n x'_{iU}{}^2}, \quad (7)$$

$$S'_{bj}{}^2 = \frac{S^2_{\text{восп}}}{\sum_{U=1}^n (x_{iU} \cdot x_{jU})^2}. \quad (8)$$

Значення дисперсій коефіцієнтів рівняння регресії зведені до табл.4.

**Таблиця 4**

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії							
S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>23</sub>	S <sub>123</sub>
1,072	0,091	0,727	0,136	0,091	0,541	0,283	0,761

Для перевірки адекватності моделі використано критерій Кохрена [13]. Коефіцієнт значущий, якщо  $G > G_{\text{табл}}$ . Для 20-ти дослідів та 3-х чинників  $G_{\text{табл}} = 0,276$  в.о. [13]. Відношення максимальної дисперсії до суми дисперсій  $G = 1,072/3,702 = 0,289$  в.о. Рівняння значуще, так як  $G = 0,289 > G_{\text{табл}} = 0,276$  в.о. В якості запобіжної апріорної невизначеності визначено ентропію результатів. Максимально допустиме розсіювання [14]  $H_{\text{max}}$ , в.о.

$$H_{\text{max}} = \log(n_S), \quad (9)$$

де  $n_S$  – кількість дисперсій коефіцієнтів рівняння регресії, в.о.

Ентропія теоретична [14]  $H$ , в. о.:

$$H = - \sum_{i=1}^n S_i \cdot \log(S_i), \quad (10)$$

де  $S_i$  – дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії, в. о.

Визначено, що розсіювання результатів знаходиться у межах норми, так як  $0,903$  в.о.  $> 0,765$  в.о. і  $H_{\text{max}} > H$  [14]. Отже, модель експерименту може застосовуватись для проведення фізичних досліджень.

Після підтвердження адекватності (придатності) моделі, записано шукане рівняння регресії

$$y = 2,293 - 0,3 \cdot x_1 - 2,407 \cdot x_2 + 0,451 \cdot x_3 - 0,259 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,531 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,801 \cdot x_2 \cdot x_3 - 2,154 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,3 \cdot (x_1^2 - 0,73) - 2,407 \cdot (x_2^2 - 0,73) + 0,451 \cdot (x_3^2 - 0,73) \quad (11)$$

Визначено, що головні чинники впливу на питому енергоємність руйнування кристалічних структур взаємопов'язані. У процесі руйнування кристалічних структур потоками індуктивної плазми кристалічні структури будуть змінюватися нелінійно у часі й просторі та знижуватиметься питома енергоємність руйнування у степеневій залежності. Через зміну кристалічних структур від впливу потоків індуктивної плазми при варіації струму та індуктивності розрядного контуру, питома енергоємність руйнування знижуватиметься за геометричним розподілом, бо залежності головних чинників мають степеневі характери.

**Висновки.** Для дослідження системи РІП обрано критерій мінімуму кількості дослідів при дотриманні вимог до якості оцінювання функції або чинників. Використано ортогональне центральне композиційне планування, що має мінімальну і достатню кількість рівнів варіювання чинників – 3. Ядром плану є повночинниковий експеримент типу  $2^3 - 3$  чинники, 20 дослідів.

Спроектовано електричну схему стенда експериментальних досліджень, яка відрізняється від відомих тим, що відсутня ємність в електророзрядному контурі. Це забезпечує вибухобезпеку та екологічність руйнування кристалічних структур потоками індуктивної плазми.

Встановлено геометричний розподіл рівняння регресії зміни питомої енергоємності руйнування при варіації струму та індуктивності розрядного контуру.

За критерієм Кохрена визначено, що рівняння регресії є значущим та адекватним, так як його значення більше за табличне на 0,013 в.о. і становить 0,289 в.о.

Визначено, що розсіювання результатів знаходиться у межах норми, бо ентропія становить 0,765 в.о. і не перевищує максимально допустиме значення 0,903 в.о., а модель експерименту може застосовуватися для проведення фізичних досліджень.

**Conclusions** In order to research IPFP system, the criterion of minimal research quantity when sticking to the requirements to function quality assessment is selected. The orthogonal central composition planning is used, which has minimal and sufficient quantity of factors variation levels – 3. The core of the plan is full factorial experiment of type  $2^3 - 3$  factors, 20 researches.

The electric scheme of experimental test bench is designed and it differs from the existing ones because it has no capacity in discharge circuit. It provides explosion safety and ecological compatibility of crystalline structures fracturing by inductive plasma flows.

Geometric distribution of regression equation of fracture specific power intense change in conditions of current variation and discharge circuit inductance.

According to the Cochran criterion, it is determined that regression equation is significant and valid because its value is bigger than table value on 0,013 r.u. and is 0,289 r.u.

It is determined that the spread of results is within normal as the entropy is 0,765 r.u. and is not bigger than maximum permitted value 0,903 r.u. and the model of the experiment can be used in order to conduct physical research.

#### Список використаної літератури

1. Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике [Текст] / Б.А. Ивоботенко, Н.Ф. Ильинский, И.П. Копылов; под ред. Г.Ф. Филаретова. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
2. Гірничий закон України від 02 вересня 2014 р. № 1193-VII (1193-18). – Введ. 2014-09-02. – 31 с.
3. Галузева програма енергоефективності та енергозбереження на період до 2017 р. – Введ. 2009-02-25. – 74 с.
4. Kausch, H.H. Polymere Fracture [Text] / H.H. Kausch. – Berlin, Heidelberg, New York.: Springer-Verlag, 1978. – 441 p.
5. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В.Р. Регель, А.И. Слуцер, Э.Е. Томашевский; под общ. ред. Д.А. Миртовой. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
6. Narisava, I. Polymere Strength [Text] / I. Narisava. – Japan.: OHMSHA, 1982. – 399 p.
7. Магnezит – тальковый (горький) шпат [Электронный ресурс] / Каталог минералов. ru. – Режим доступа: <http://www.catalogmineralov.ru/article/363.html#>.
8. Залізни руди [Електронний ресурс] / Вікіпедія. Вільна енциклопедія. - Режим доступу: [http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7%D0%BD%D1%96\\_%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%B8](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7%D0%BD%D1%96_%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%B8).



9. Кремній [Електронний ресурс] / Мінерали та породи. - Режим доступу : <http://answers.in.ua/shho-take-kremnij>.
10. Кальцит [Електронний ресурс] / Вікіпедія. Вільна енциклопедія. – Режим доступу: <http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%B8%D1%82>.
11. Зевин, М.Б. Справочник молодого електромонтера [Текст] / М.Б. Зевин, Е.П. Парини. – М.: Высш. шк., 1984. – 192 с.
12. Ташлинский, А.Г. Ортогональные и рототабельные центральные композиционные планы эксперимента [Текст] / А.Г. Ташлинский, Г.Л. Минкинав. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 39 с.
13. Таблиці критичних значень основних статистичних критеріїв. Методична розробка для практичних занять з дисципліни «Основи статистичного обліку в екології» для курсантів та студентів напряму підготовки 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» [Текст] / М.А. Петрова. – Львів: ЛДУБЖ, 2012. – 10 с.
14. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.

*Отримано 26.12.2014*