

1. Blinov I.V., Parus Ye.V., Polischuk O.Yu., Zhuravlov I.V. Monitoring of overhead lines using fault indicators // Power and Electrification. – 2013. – № 9. – S. 7-11.
2. Arzhannikov E.A. Methods and instrumentation for determining short-circuit lines: [Textbook] / E.A. Arzhannikov, A.M. Chuhin. – Ivanovo: Ivanovskiy gos. energeticheskiy un-t, 1988. – 74 s.
3. Shalyt G.M. Definition fault places of overhead lines by parameters in emergency mode / G.M. Shalyt, A.I. Ayzenfel'd, A.S. Malyu; pod red. G.M. Shalyta. – [2e izd., pererab. i dop.]. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 208 s.
4. Irodov I.E. Basic laws of electromagnetism: [Textbook for university students] / I.E. Irodov. – M.: Vyssh. sshk., 1991. – 289 s.
5. Bjerkan E., Venseth T. Locating Earth-Faults in Compensated Distribution Networks by means of Fault Indicators // International Conference on Power Systems Transients (IPST'05) – 2005. – Paper № IPST05 – 107 p.

УДК 621.316:681.3

Е.Ю. ПОЛИЩУК, аспірант

Институт электродинамики Национальной академии наук Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03680, Украина

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ АВАРИЙНЫХ УЧАСТКОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДИКАТОРОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ

*В статье приведены особенности функционирования устройств, определяющих место повреждения воздушных линий электропередачи. Целью исследования является определение особенностей использования индикаторов повреждений в распределительных электрических сетях и методика определения мест установки и количества индикаторов. Методика заключается в изучении процесса выявления повреждения с помощью параметров аварийного режима и анализе требований и особенностей при расстановке индикаторов повреждений в сети. Результатами исследования являются определенные составляющие методики расположения устройств, которые анализируют состояние распределительной сети и определяют аварийные участки с учетом основных теоретических положений их работы и характеристик. Проведенные исследования свидетельствуют о необходимости проведения дальнейшего развития в направлении детализации полученных результатов и определения системного подхода для автоматизации поиска и локализации места повреждения линий электропередачи.*

**Ключевые слова:** индикатор, повреждение, линии электропередачи, магнитное поле, электрическое поле.

УДК 622.1/.2

І. М. СТРЕЛЬЦОВА, аспірант,

О. М. ТЕРЕНТЬЄВ, д-р техн. наук, професор;

### ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗМІНИ ПИТОМОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ РУЙНУВАННІ ОБЕРТОВО-ГІДРОКАВІТАЦІЙНИМ СПОСОБОМ

У статті обрано та обґрунтовано тип плану експериментального дослідження зміни питомої поверхневої енергії гірських порід при руйнуванні обертово - гідрокавітаційним способом – ненасичений центральний композиційний план. Поставлена задача оптимізації - знаходження значення кута та довжини дифузора різця кавітаційного, що забезпечують максимальну продуктивність при мінімальній енергоємності. Визначені незалежні змінні параметри - кута та довжини дифузора різця кавітаційного з відповідними рівнями варіювання:  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  та 0.006 м, 0.009 м, 0.012 м. Прийнято параметр оптимізації – енергоємність руйнування. Пораховано необхідну і достатню кількість дослідів – дев'ять. Побудовані матриці планування експерименту у явному та не явному вигляді з зазначенням порядку проведення дослідів. Створено функціональну схему експериментального стенду. Для дослідження зміни питомої поверхневої енергії при руйнуванні вищевказаним способом обрано метод Обреїмова.

**Ключові слова.** гірська порода, руйнування, план, експеримент, енергоємність, матриця

**Вступ**

З часів досліджень Алана Гриффітса (20-ті роки ХХ ст.) питома поверхнева енергія (ППЕ) розглядається як «константа матеріалу». Згідно експериментальних даних [1], ППЕ змінюється в залежності від оточуючого середовища і впливає на процес руйнування гірських порід ГП. Ці експериментальні факти спростовують припущення, що ППЕ є «константою матеріалу». Звідси, ППЕ впливає на енергоємність руйнування. Створено математичну модель ППЕ ГП при руйнуванні представлена у попередніх дослідженнях [1]. В доповнення розроблено новий енергозберігаючий комбінований обертово-гідрокавітаційний спосіб (ОГКС) руйнування ГП наведений в [2]. По результатам теоретичних досліджень дозволяє знизити енергоємність на 10 %.

Руйнуванням ГП, удосконаленням старих і розробкою нових способів займалися: В.І. Бондаренко, В.І. Брилін, В.Л. Бритаєв, Ю.В. Горюнов, С.М. Журков, Ф.І. Кучерявий, В.З. Партон, О.О. Скочинський, О.М. Терпигорьєв, Л.Д. Шевяков, Є.І. Шемякин та інші [3-9]. Проте, до сьогодні задача розробки енергозберігаючого обладнання для руйнування ГП залишається актуальною, що підтверджено постановою Кабінету Міністрів України від 1 березня 2010 р. № 243 [10]. Тому, для зниження енергоємності руйнування ГП та обґрунтування розробки нового способу заплановано провести синтезовані експериментальні дослідження зміни ППЕ ГП при руйнуванні ОГКС. Для отримання достовірних результатів необхідно провести планування експерименту та визначити параметри експерименту: задачу оптимізації, необхідну і достатню кількість дослідів, порядок їх проведення, незалежні змінні та рівні їх варіювання тощо.

**Метою** роботи є планування експериментальних досліджень зміни питомої поверхневої енергії при руйнуванні гірських порід для обґрунтування нового енергозберігаючого обертово - гідрокавітаційного способу.

**Завдання дослідження.**

1. Обрання та обґрунтування типу плану експерименту.
2. Визначення необхідної і достатньої кількості дослідів.
3. Обрання незалежних змінних параметрів та їх рівнів варіювання.
4. Побудова матриці планування експерименту у явному та неявному вигляді.
5. Створення функціональної схеми експериментального стенду.

**Матеріал і результати досліджень.** Для проведення досліджень по визначенню зміни питомої поверхневої енергії (ППЕ) гірських порід при руйнуванні обертово - гідрокавітаційним способом, обрано незалежні змінні параметри: кут розкриття та довжину дифузора різця кавітаційного. Вибір цих параметрів обумовлений тим, що від них залежить виникнення і характер перебігу субрезонансних та резонансних процесів на поверхні гірських порід при руйнуванні та, як наслідок, зміна ППЕ. Обрані змінні параметри співставлено з вимогам [11]: параметри змінюються лише за вимогами дослідника; визначаються з похибкою не більшою, ніж 5 %; вимірювані; встановлення деякого рівня одного не залежить від прийнятих значень іншого; комбінація на будь-яких рівнях здійсненна.

Енергоємність руйнування гірських порід обертово-гідролічним резонансним способом з використанням різця кавітаційного є одним з основних інтегральних параметрів оптимізації об'єкту дослідження. Продуктивність також враховуватиметься, як обернено-пропорційний параметр оптимізації. Енергоємність руйнування відповідає наступним вимогам [11]: характеризує процес руйнування гірських порід; відноситься до енергетичних параметрів; має кількісний характер; визначається для різних видів гірських порід, тобто є універсальним показником.

Задачею оптимізації є знаходження значення кута та довжини дифузора різця кавітаційного, що забезпечують максимальну продуктивність при мінімальній енергоємності руйнування гірських порід.

Для аналітичного дослідження залежності енергоємності руйнування гірських порід від зміни ППЕ обрано метод математичного моделювання. Дослідження проводиться на основі функціональної математичної моделі зміни ППЕ та енергоємності від обраних незалежних змінних. На енергоємність руйнування впливають також: відстань між атомами структури; тип кристалічної решітки; межа міцності на розрив міжмолекулярного зв'язку; коефіцієнт тертя інструменту об породу; теоретична межа міцності, модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона тощо. Але ці параметри не було прийнято як зміни стану, оскільки не виконуються умови керованості і незалежності. Функціональність математичної моделі полягає у відображенні фізичного процесу зміни ППЕ та енергоємності гірських порід при руйнуванні під дією резонансних явищ.

Для визначення залежності енергоємності руйнування гірських порід від вищевказаних змінних параметрів прийнято повночинниковий експеримент вигляду  $2^k$  ( $k$  – кількість змінних параметрів). Досліджувані змінні варіюються на двох рівнях: максимальному (+) та мініимальному (-) і розташовані симетрично відносно нульового рівня (0) [12]. При такій кількості рівнів, для дослідження енергоємності руйнування, обрано ненасичений центральний композиційний план типу  $B_n$  [13, 14]. Поняття «центрального» означає, що чинники приймають значення, симетричні відносно центру плану, умовної нульової лінії. Не насиченість плану обумовлена тим, що кількість незалежних змінних параметрів

менша кількості дослідів. Тип  $B_n$  є симетричним планом другого порядку з ядром у вигляді повночинникового експерименту  $2^k$ . Результати дослідів в нульовій точці застосовуються для перевірки гіпотези про адекватність моделі експериментальним даним [14]. При такому типі плану обрано поліноміальний клас регресійної моделі [11, 12] (1-3). Якщо обрана модель не відповідатиме перевірці на адекватність, то степінь полінома буде збільшено.

Математична модель оптимізації, перетворена згідно загальної теорії [11 - 12, 15 - 16] до випадку дослідження енергоємності руйнування гірських порід в залежності від кута та довжини дифузору різця кавітаційного має вигляд:

$$q = b_0 + b_1 \cdot \beta + b_2 \cdot g + b_{12} \cdot \beta \cdot g + b_{11} \cdot \beta^2 + b_{22} \cdot g^2, \quad (1)$$

$$\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max} (\beta \geq 0), \quad (2)$$

$$g_{\min} \leq g \leq g_{\max} (g \geq 0), \quad (3)$$

де  $q$  – параметр оптимізації - енергоємність руйнування гірських порід, Дж/м<sup>3</sup>;

$b_j$  – коефіцієнти рівняння регресії, в.о.;

$\beta_{\min}, \beta_{\max}$  - граничні обмеження кута розкриття дифузору, градус;

$g_{\min}, g_{\max}$  – граничні обмеження довжини дифузору, м.

Загальна кількість дослідів для ненасиченого центрального композиційного плану типу  $B_n$  складає [14], шт.:

$$N = N_0 + 2k + 1, \quad (4)$$

де  $N_0 = 2^k$  – кількість точок ядра плану.

При  $k=2$ , кількість дослідів  $N = 2^2 + 2 \cdot 2 + 1 = 9$ . Обраний тип плану передбачає мінімальну кількість рівнів варіювання змінних параметрів рівну трьом. Це дозволяє більш точно витримувати режими роботи при проведенні дослідів у порівнянні з планами, які потребують більшої кількості рівнів значень керованих змінних. У кожній точці проводиться рівна кількість дослідів [13, 14, 17].

Для побудови плану експерименту необхідно обрати критерії оптимальності. Вони поділяються на дві групи: критерії пов'язані з помилками коефіцієнтів рівняння регресії та критерії пов'язані з помилками поверхні відгуку. Перший група критеріїв характеризує еліпсоїд розсіювання коефіцієнтів, математичним сподіванням і дисперсією значень помилок. Просторове розташування, форма, і розмір еліпсоїда повністю залежать від плану експерименту. До першого типу відносяться критерії: А, D, Е і т.д. [18]. Критерії другої групи використовуються при вирішенні задач опису поверхні відгуку, визначення обмежень та значення параметрів.

Обраний для дослідження ненасичений центральний композиційний план типу  $B_n$ , наближений до D- та G- оптимальних планів. Критерій G-оптимальності є основним у другій групі. Дозволяє побудувати план з мінімальним значенням найбільшої помилки в описі функції відгуку [18]. Критерій D-оптимальності - відповідає мініальному обсягу еліпсоїда розсіювання помилок. У даному плані чинники максимально незалежні один від одного. Цей план мінімізує очікувану помилку передбачення функції відгуку.

Матриця планування експериментального дослідження енергоємності руйнування гірських порід в

умовних змінних (де  $N_z = \sum_{i=1}^N x_i^2$  [19]) приведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Матриця планування експерименту у неявному вигляді

№ дослідів	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 x_1$	$x_2 x_2$	$y$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	+	+	+	+1/3	+1/3	$y_1$
2	+	-	+	-	+1/3	+1/3	$y_2$
3	+	+	-	-	+1/3	+1/3	$y_3$
4	+	-	-	+	+1/3	+1/3	$y_4$
5	+	+	0	0	+1/3	-2/3	$y_5$
6	+	-	0	0	+1/3	-2/3	$y_6$
7	+	0	+	0	-2/3	+1/3	$y_7$
8	+	0	-	0	-2/3	+1/3	$y_8$
9	+	0	0	0	-2/3	-2/3	$y_9$
$N_z$	9	6	6	4	2	2	-

Для усіх елементів матриці планування виконується умова парної ортогональності стовпців [18]. Чинник  $x_0$  – фіктивна змінна, що допомагає спростити розрахунки коефіцієнтів рівняння регресії.

Для проведення експериментальних досліджень створено функціональну схему стенду системи руйнування гірських порід, рисунок 1. Експериментальний стенд представляє собою функціонально-фізичну модель. Тобто, назначений для вивчення фізичного явища, що використовуються для реалізації закладених у систему функцій. Таким явищем є зміна ППЕ під дією зміни кута та довжини дифузору різця. Функціями системи є збільшення штучної тріщинуватості вибою під дією кавітаційного потоку та зменшення енергоємності руйнування гірських порід.

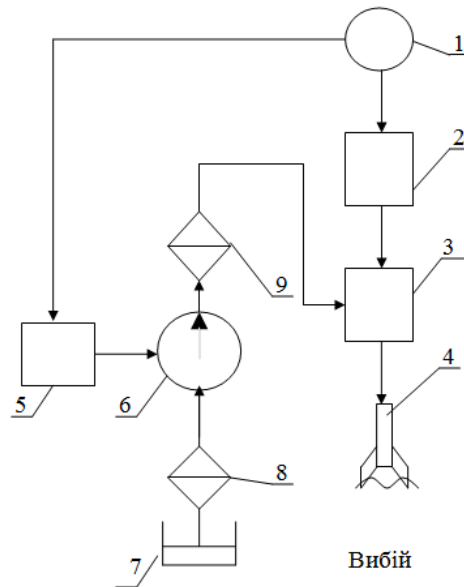


Рисунок 1 – Функціональна схема стенду системи руйнування гірських порід МГКС: 1 – електрична мережа змінного струму 220 В; 2 – свердлильний станок; 3 – вертлюг; 4 – різець кавітаційний; 5 – випрямляч; 6 – насос центр обіжний з двигуном постійного струму; 7 – резервуари; 8 – фільтр грубої очистки, 9 – фільтр тонкої очистки

Експериментальна установка розроблена на базі свердлильного станка Ш2910А (позиція 2). Для забезпечення утворення кавітації на виході різця (позиція 4) виконано систему подачі води. Вона складається з вертлюга 3 приєднаного до свердлильного станка через перехідник, насосу ЭЦН-19А (позиція 6), фільтру грубої очистки 8, фільтру тонкої очистки 9 та резервуару 7. Вибір типу насоса обумовлений тим, що він має вбудований двигун постійного струму з номінальним значенням 2.7 А. Це зменшує габарити установки та кількість структурних елементів схеми і тим самим підвищує її надійність. Для випрямлення струму від електричної мережі 220 В до двигуна насоса використано випрямляч ВСА-5К. Останній має діапазон випрямлення 0...12 А. Зображення різця кавітаційного та принцип дії представлено в [2].

Руйнування обертово-гідролічним резонансним способом з використанням різця кавітаційного полягає в ініціюванні енергетичного потенціалу коливання молекул гірських порід. Рідина, що знаходиться на периферії каверн при їх зхлопуванні, набуває високої швидкості. Міжмолекулярні зв'язки породи руйнуються за рахунок виникнення субрезонансних та резонансних режимів від коливальних імпульсів надвисоких тисків, які їй передаються.

Для визначення ППЕ порід, що руйнуються використано метод Обреїмова або методом розщеплення [19; 20]. Він заснований на вимірюванні сили  $F_c$ , яку необхідно прикласти до зразка для того, щоб утворена тріщина почала зростати. Зв'язок  $F_c$  з ППЕ, модулем Юнга та параметрами тріщини, Дж/м<sup>2</sup> [19; 20]:

$$\gamma = \frac{6 \cdot (F_c \cdot l_m)^2}{E \cdot d_m^2 \cdot h^3}, \quad (5)$$

де  $l_m$  – довжина тріщини, м;

$E$  – модуль Юнга, Па;

$d_m$  – глибина тріщини, м;

$h$  – товщина зразка породи від краю до тріщини, м.

Після руйнування зразка, середнє значення геометричних параметрів тріщин будуть виміряні за допомогою мікроскопа Celestron Advanced Biological Microscope. Модуль Юнга є константою матеріалу і визначається з довідкової літератури. Зразок буде випробуваний на пресі П-125. Останній оснащений торсіонним гідравлічним динамометром, за допомогою якого будуть зняті дані прикладеної сили для розрахунку ППЕ. Для визначення витрат у системі подачі води та тиску на виході дифузору будуть використані: витратомір КАРАТ-РС 20 та манометр ДМ-05-МП-3У, відповідно.

Із експериментальних даних [21] відомо, що при куті розкриття дифузору  $\beta=60^\circ$ , частота автоколивань системи - найбільша. Тому, це значення прийняте за нульовий рівень. Відношення діаметра в критичному перерізі  $d_{кр}$  до довжини дифузору  $g$  дорівнює 5:3 [21]. Виходячи з вище перелічених умов та геометричних параметрів лабораторної установки, прийнято діаметр критичного перерізу  $d_{кр}=0.015$  м. Тому за нульову лінію довжини дифузору прийнято  $g=0.009$  м.

При виборі граничних умов незалежних змінних параметрів, ураховано наступні типи обмежень:

- принципові, що не можуть бути змінені в ході проведення експерименту: структура масиву, його фізико – механічні характеристики;
- техніко-економічні: вартість руйнування гірських порід, вартість обладнання та контрольно-вимірювальних приладів;
- експериментальні: застосування існуючого програмного та лабораторного забезпечення для обробки результатів досліджень.

Вибір інтервалу варіювання незалежних змінних параметрів та значення на усіх рівнях варіювання представлений у таблиці 2.

Таблиця 2 – Значення незалежних змінних параметрів та інтервалів варіювання

Найменування і позначення чинників	Рівні варіювання			Інтервали варіювання
	-1	0	+1	
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Кут дифузора різця кавітаційного $\beta$ , град	45	60	75	15
Довжина дифузора різця кавітаційного $g$ , м	0.006	0.009	0.12	0.003

Матриця планування експерименту в явному вигляді представлена у таблиці 3.

Таблиця 3 – Матриця планування експерименту в явному вигляді

№ дослідю	Порядок проведення дослідів	$x_0$	Планування	
			$x_1$	$x_2$
			Кут розкриття дифузору $\beta$ , град	Довжина дифузору $g$ , м
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
1 етап				
1	4	+	45	0.006
2	6	+	45	0.009
3	2	+	45	0.012
2 етап				
4	8	+	60	0.006
5	9	+	60	0.009
6	7	+	60	0.012
3 етап				
7	3	+	75	0.006
8	5	+	75	0.009
9	1	+	75	0.012

План проведення експериментальних досліджень передбачає 3 етапи. Це пов'язано з конструктивними особливостями різця кавітаційного та з метою економії матеріальних ресурсів. Для першого етапу дослідження розроблено три види дифузорних насадок різця кавітаційного: з довжиною дифузору 0.006, 0.009, 0.012 м та кутом розкриття  $45^\circ$ . Для другого та третього етапу досліджень будуть використані ті ж самі насадки, але після розточування дифузоров до  $60^\circ$  та  $75^\circ$  відповідно.

Важливими параметрами для обраного способу руйнування є напір та швидкість потоку рідини на виході дифузору. Від їх значень залежить режим руху рідини та число Рейнольдса  $Re$  (як вказано вище, умовою

кавітації є  $Re > 7340$  [22]). Розрахунок необхідних значень напору та швидкості потоку рідини розраховані і представлені у розділі 3.

Дослідження ПШЕ  $\gamma$  (Дж/м<sup>2</sup>) під дією резонансних явищ від зміни кута розкриття  $\beta$  (град) та довжини дифузору  $g$  (м) проводитиметься для вугілля, кварцу та кам'яної солі. За результатами проведення дослідів буде отримано три залежності, що відповідають кожному етапу досліджень:  $\gamma=f(g)$  при  $\beta=45^\circ$ ;  $\gamma=f(g)$  при  $\beta=60^\circ$ ;  $\gamma=f(g)$  при  $\beta=75^\circ$ . На кожній залежності буде знаходитись три криві, що відповідають кожному з видів гірських порід: вугіллю, кварцу та кам'яній солі, відповідно. Експеримент виконується згідно з матрицею планування експерименту у явному вигляді (таблиця 3).

### Висновки

1. Для дослідження енергоємності руйнування порід, в залежності від зміни питомої поверхневої енергії гірських порід під дією резонансних явищ, обрано ненасичений центральний композиційний план типу  $V_n$  з мінімальною кількістю рівнів варіювання змінних – три. Кількість дослідів – 9, кількість повторних дослідів у кожній точці – 3. Ядром плану є повночинниковий експеримент вигляду  $2^k$ .
2. У якості незалежних змінних параметрів дослідження обрані кут розкриття та довжина дифузору різця кавітаційного. Рівні варіювання:  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  та 0.006 м, 0.009 м, 0.012 м, відповідно.
3. Для проведення експериментальних досліджень створено функціональну схему стенду по руйнуванню гірських порід магнітно-кавітаційним комбінованим способом з використанням різця кавітаційного. Розроблена на базі свердлильного станка Ш2910А з системою подачі води. Остання складається з вертлюга, переходника, насоса ЭЦН-19А, фільтрів грубої та тонкої очистки та резервуару. Для випрямлення струму від електричної мережі 220 В до двигуна насоса використано випрямляч ВСА-5К.
4. Вимірювання зміни питомої поверхневої енергії зруйнованого зразка проводитиметься за методом Обреїмова (метод розщеплення). Для аналізу експериментальних даних обрані наступні вимірювальні прилади: прес П-125 з вбудованим торсіонним гідравлічним динамометром, мікроскоп Celestron Advanced Biological Microscope, витратомір КАРАТ-РС 20 та манометр ДМ-05-МП-3У.

### Література

1. Терентьев О. М. Математична модель управління питомою поверхневою енергією руйнування гірських порід / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. - Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 3 (80), 2013, с. 153-157.
2. Терентьев О. М. Энергоёмкость разрушения горных пород комбинированным механико-гидрокавитационным способом / О. М. Терентьев, И. Н. Стрельцова. - Serbia, Neoplanta: Theoretical & Applied Science. № 12 (8), 2013, с. 22 – 26. ISSN 2308-4944.
3. Пестриков В. М., Механика разрушения твердых тел. / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – Санкт-Петербург: «Профессия», 2002 – 300 с.
4. Obreimow I. W. Eine Methode zur Herstellung einkristalliger Metalle/ I.W. Obreimow, L. W. Schubnikow. - Zeitschrift für Physik. – 1924. – Vol. 25, Iss. 1. – PP. 31–36.
5. Кравець В. Г. Прикладна геодинаміка вибуху в гірництві та геотехнічному будівництві / В. Г. Кравець, О. О. Вовк, В. В. Котенко, О. М. Терентьев. – Житомир, 2012. – 162 с.
6. Брылин В. И. Бурение скважин специального назначения/ В. И. Брылин, Ю. М. Кожушко. Томск: ТПУ, 2006. 255 с.
7. Кучерявый Ф. И. Разрушение горных пород/ Ф. И. Кучерявый М.: Недра, 1972. 240 с.
8. Бондаренко В. И. Технология подземной разработки пластовых месторождений полезных ископаемых/ В. И. Бондаренко, А. М. Кузьменко, Ю. Б. Грядущий, В. А. Гайдук и другие. Днепропетровск: Полиграфист, 2003. 708 с. ISBN 966-684-085-5.
9. Партон В. З. Механика разрушения: От теории к практике/ В. З. Партон. М.: Наука, 1990. 240 с. ISBN 978-5-382-00157-9.
10. Кабінет Міністрів України, постанова від 1 березня 2010 р. № 243 «Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010 - 2015 роки» [Електронний ресурс]. – Режим доступа: \www/ URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-p> – Заголовок с екрана.
11. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.
12. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов / Д. Финни; под. ред. академика Ю. В. Линника - М. : 1970 г. - 287 с.
13. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
14. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – К. : Вища школа, 1976. – 184 с.

15. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион ; под ред. к.т.н. Э.К. Лецкого, д.т.н. Е.В. Марковой. - М. : Мир – 1981 г. - 516 с.
16. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. К. Лецкий, В. Шеффер ; под ред. к.т.н. Э. К. Лецкого. - М. : Мир – 1977 г. - 552 с.
17. Жирабок А. Н. Планирование эксперимента для построения математических моделей / А. Н. Жирабок. Соросовский образовательный журнал, том 7, № 9, 2001. – с. 121-127.
18. Аністратенко В. О. Математичне планування експериментів в АПК: [Навчальний посібник] / В. О. Аністратенко, В. Г. Федоров. - К. : Вища школа, 1993. - 375 с., ISBN 5-11-002551-1.
19. Методы определения поверхностного натяжения жидкостей и удельной свободной поверхностной энергии твердых тел. [Электронный ресурс]/ Сайт «Физика и химия поверхности» <http://do.nano.fcior.edu.ru/mod/page/view.php?id=90> – Заголовок з екрану.
20. Савицкая Т. А. Коллоидная химия [Текст] / Т. А. Савицкая, Д. А. Котиков. - Минск : Белорусский государственный университет, 2006. – 86 с.
21. Штеренлихт Д. В. Гидравлика [Учебн. для ВУЗов – в 2-х кн.: Кн. 1 – 2-е изд., перераб., и дополн.] / Д. В. Штеренлихт – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 351 с.
22. Иванов В. М. Парогазовые процессы и их применение в народном хозяйстве [Текст] / В. М. Иванов. – М. : Наука, 1970. – 320с.

I. STRELTCOVA, postgraduate student  
O. TERENTIEV, D.Sc., Ass.Prof

#### PLANNING AN EXPERIMENTAL RESEARCH OF SPECIFIC SURFACE ENERGY CHANGE OF ROCK'S DURING DESTRUCTION BY THE ROTARY-HYDROCAVITATION METHOD

In article plan type of experimental research of changes rocks specific surface energy during destruction by rotating – hydrocavitation method selected and justified. It is central composite plan. The task of optimization is to fine the angle and length of the cavitation cutter diffuser, which provide maximum performance at minimum intensity. Independent variables identified. There are: the angle and length of the cavitation cutter diffuser with appropriate levels of variation:  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  and 0.006 m, 0.009 m, 0.012 m. Optimization parameter adopted. It is - energy intensity of rock breaking. The necessary and sufficient number of experiments calculated - nine. Experimental matrix developed in explicitly and not explicitly form with specifying the order of conducting the experiments. A functional diagram of the experimental stand designed. Obreimov's method was chosen for investigating of the specific surface energy changes during rock breaking.

**Keywords.** rocks, breacking, plan, experiment, energy, the matrix

#### Referenses

1. Terentiev, O. M., Streltcova, I. N. (2013). “The energy intensity of rock breaking by mechanic-hydrocavitation method”. Ukraine, Kremenchug: Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho, no 3(80), pp. 153-157.
2. Terentiev, O. M., Streltcova, I. N. (2013) “Geometrical and frequency parameters of rotaryhydrocavitation work instrument's pulse generation”. Serbia, Neoplanta: Theoretical & Applied Science. № 12 (8), pp. 22 – 26.
3. Pestrikov, V.M. and Morozov, E.M. (2002). Mekhanika razrusheniya tverdykh tel [Mechanics of solid bodies breaking]. Professiya, Sankt-Petersburg, Russia
4. Obreimow I. W. Eine Methode zur Herstellung einkristalliger Metalle/ I.W. Obreimow, L. W. Schubnikow. - Zeitschrift für Physik. – 1924. – Vol. 25, Iss. 1. – PP. 31–36.
5. Kravets, V.H., Vovk, O.O., Kotenko, V.V. and Terentiev, O.M. (2012) Prykladna heodynamika vybuhu v hirnyctvi ta heotekhnichnomu budivnytctvi [Applied rock blast geodynamics and geotechnical construction], Zhitomyr, Ukraine.
6. Brylin, V.I. (2006). Burenii skvazhyn spetsialnogo naznacheniiia. [Well drilling of special purpose]. TPU, Tomsk, Russia.
7. Kucheriavyi, F.I. and Kozhushko, Yu.M. (1972). Razrusheniie gornykh porod. [Rock breaking]. Nedra, Moskov, Russia.
8. Bondarenko, V.I., Kuzmenko, A.M., Hryadushchii, Yu.B., Haiduk, V.A., Kolokolov, O.V., Tabachenko, N.M. and Pochepov, V.N. (2003). Tekhnologiya podzemnoi razrabotki plastovykh mestorozhdeniy poleznykh iskopaiemykh [Technology of underground reservoir of mineral deposits]. Polihrafist, Dnepropetrovsk, Ukraine.
9. Parton, V.Z. (1990). Mekhanika razrusheniia. Ot torii k praktike. [Mechanics of rock breaking. From theory to practice]. Nauka, Moskov, Russia.

10. Cabinet of Ministers of Ukraine Resolution of March 1, 2010 № 243 "On approval of the State Target Economic Program on energy efficiency and the development of energy production from renewable energy sources and alternative fuels in 2010 - 2015" [electronic resource] / Cabinet of Ministers of Ukraine Website - access: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-п> - title of the screen.
11. Adler, Yu. P. (1976). Planirovaniye eksperementa pri poiske optimalnykh resheniy [Planning an experiment in finding optimal solutions]. Nauka, Moskov, Russia.
12. Finni, D. (1970). Vvedeniye v teoriyu planirovaniya eksperementov [Introduction to design of experiments]. Nauka, Moskov, Russia.
13. Spiridonov, A. A. (1981). Planirovaniye eksperementov pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov [Experiment in planning processes]. Mashinostroenie, Moskov, Russia.
14. Bondar, A. G., Statiukha, G. A. (1976). Planirovanie eksperimenta v khimicheskoi tekhnologii [Experimental design in chemical technology]. Vyscha shkola, Kyiv, Ukraine.
15. Dzhonson, N., Lion, F. (1981). Statistika I planirovaniye eksperimenta v tekhnike i nauke [Statistics and experimental design in engineering and science]. Mir, Moskov, Russia.
16. Khartman, K., Letckiy, E. K., Sheffer, V. (1977) Planirovaniye eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov [Design of experiments in the study of technological processes]. Mir, Moskov, Russia.
17. Zhirabok, A. N. (2001). "Planning an experiment for construction of mathematical models", Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal, vol. 7, no 9, pp. 121-127.
18. Anistratenko, V. O. (1993). Matematychnye planuvanniya eksperymentiv v APK [Mathematical planning of experiments in agriculture]. Vyscha shkola, Kyiv, Ukraine.
19. "Methods for determining the surface tension of liquids, and the specific surface free energy of solids" [electronic resource] / Physics and chemistry of the surface. Website - access: <http://do.nano.fcior.edu.ru/mod/page/view.php?id=90> - title of the screen.
20. Savitskaia, T. A. (2006). Kolloidnaia khimiia [Colloid chemistry]. Belorusskiy gosudarstvennyi universitet, Minsk, Belarus.
21. Shterendtlisht, D. V. (1995). Gidravlika [Hydraulics]. Energoatomizdat, Moskov, Russia.
22. Ivanov, V. M. (1970). Parogazovyye protsessy i ikh primeneniye v narodnom khoziaistve [Combined-cycle processes and their application in the national economy]. Nauka, Moskov, Russia.

УДК 622.1/2

**И. Н. СТРЕЛЬЦОВА**, аспирант  
**О. М. ТЕРЕНТЬЕВ**, д-р техн. наук, профессор;

### **ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРУШЕНИИ ВРАЩАТЕЛЬНО-ГИДРОКАВИТАЦИОННЫМ СПОСОБОМ**

В статье выбран и обоснован тип плана экспериментального исследования изменения удельной поверхностной энергии горных пород при разрушении оборотно - гидрокавитационным способом - ненасыщенный центральный композиционный план. Поставлена задача оптимизации - нахождение значения угла и длины диффузора резца кавитационного, обеспечивающие максимальную производительность при минимальной энергоёмкости. Определены независимые переменные параметры - угол и длины диффузора резца кавитационного с соответствующими уровнями варьирования:  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  и 0.006 м, 0.009 м, 0.012 м. Принят параметр оптимизации - энергоёмкость разрушения. Посчитано необходимое и достаточное количество опытов - девять. Построены матрицы планирования эксперимента в явном и не явном виде с указанием порядка проведения опытов. Создана функциональная схема экспериментального стенда. Для исследования изменения удельной поверхностной энергии при разрушении вышеуказанным способом выбран метод Обреимова.

**Ключевые слова.** горная порода, разрушение, план, эксперимент, энергоёмкость, матрица.