

сейсмічного процесу і закону повторюваності сейсмічних подій, зареєстрованих мікросейсмічним методом в низькочастотному діапазоні пружних коливань.

Список використаних джерел

1. Lama, R. D. Improving the Efficiency of Gas Drainage Systems [Text] / Lama. // NERDDP Project. – 1986. – №574. – С. 462.
2. Bodziony, J. Sudden outbursts of gas and coal in underground coal mines [Text] / J. Bodziony, R. D. Lama. // ACARP Project. – 1996. – С. 677.
3. Telfer, W. H. Discussions of Rowan's paper on "An outburst of coal and firedamp at Valley Field Colliery, Newmills, Fife [Text] / Telfer. // Trans. Inst. Min. Engrs. – 1911. – №42. – С. 274.
4. Belov, V. I. New explanation of sudden outbursts of methane [Text] / Belov. // Gornyi Zhurnal. – 1931. – №6. – С. 46.
5. Khodot, V. V. The mechanism of sudden outbursts [Text] / Khodot. // Ugal. – 1951. – №12. – С. 6–11.
6. Bodziony, K. Modelling of outbursts at #26 Colliery, Glace Bay, Nova Scotia [Text] / K. Bodziony, D. Kullmann. // Mining Science and Tech. – 1990. – №2. – С. 261–268.

Стаття надійшла до редакції 21.12.2015 р.

UDC 622.2

O. Terentiev, doctor of Science, prof., **A. Kleshchov**, postgraduate (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

SUBRESONANT LOAD ENERGY REGULATION WHEN ELECTROTHERMAL ROCK FRACTURING

О.М. Терентьев, д.т.н., проф., **А.Й. Клещов**, аспирант (НТУУ «КПІ»)

РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ СУБРЕЗОНАНСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОМУ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

It is determined that inductive plasma flows energy regulation will reduce specific energy intensity of crystalline structures fracture with the help of n-component fracture system accommodation. Rock fracturing is considered at the level of crystalline structures (femtolevel). Crystalline structure oscillations are caused by the presence of internal and external factors. External factors are represented by changing the parameters of inductive plasma flows: concentration; temperature; energy; exposure time of crystalline structure. Opportunities stand it possible to determine the inductive plasma physical parameters impact on crystalline structure of the samples, which were prepared for experimental tests. For the first time the mathematical model of plasma flow energy is introduced, which differs from the existing ones with the fact that it links discharge circuit inductance and current of the electrothermal rock fracturing plant with the

characteristics of its operating tool – plasma flow. This allows to reduce specific energy intensity of crystalline structure fracturing by varying discharge circuit inductance and current when changing the structures parameters with the help of switches system.

Keywords: *inductive plasma; rock fracture; crystalline structure; subresonant flow; internal factors.*

Встановлено, що регулювання енергії потоків індуктивної плазми дозволить знизити питому енергоємність руйнування кристалічних структур гірських порід акомодациєю n-компонентної системи руйнування. Руйнування гірських порід розглянуто на рівні кристалічних структур (фемторівні). Коливання кристалічної структури обумовлюються наявністю внутрішніх та зовнішніх чинників. Зовнішні чинники представлені зміною параметрів потоків індуктивної плазми: концентрації; температури; енергії; часу впливу на кристалічну структуру. Визначено вплив фізичних параметрів індуктивної плазми на кристалічну структуру зразків, що готувалися для експериментальних випробувань. Вперше запропонована математична модель енергії плазмового потоку. Вона відрізняється від відомих тим, що зв'язує індуктивність, струм розрядного контуру установки електротермічного руйнування гірських порід із характеристиками її робочого інструменту – плазмовим потоком. Встановлено прямопропорційну залежність енергії плазмового потоку від струму розрядного контуру та оберненопропорційну залежність енергії плазмового потоку від індуктивності розрядного контуру. Це дозволяє знизити питому енергоємність руйнування кристалічних структур, варуючи індуктивність та струм розрядного контуру при зміні параметрів структур системою ключів.

Ключові слова: *індуктивна плазма; руйнування гірських порід; кристалічна структура; субрезонансний потік; внутрішні чинники.*

Определено, что регулирование энергии потоков индуктивной плазмы позволит снизить удельную энергоёмкость разрушения кристаллических структур горных пород аккомодацией n-компонентной системы разрушения. Разрушение структур рассмотрены на уровне кристаллических структур (фемтоуровне). Колебания кристаллической структуры обуславливаются наличием внутренних и внешних факторов. Внешние факторы представлены изменением параметров потоков индуктивной плазмы: концентрации; температуры; энергии; времени воздействия на кристаллическую структуру. Возможности стенда позволили определить влияние физических параметров индуктивной плазмы на кристаллическую структуру образцов, которые готовились для экспериментальных испытаний. Впервые предложена математическая модель энергии плазменного потока, которая отличается от известных тем, что связывает индуктивность, ток разрядного контура установки электротермического разрушения горных пород с характеристиками ее рабочего инструмента – плазменным потоком. Установлено прямопропорциональную зависимость энергии плазмового потока от тока разрядного контура и обратнопропорциональную зависимость энергии плазмового потока от индуктивности разрядного контура. Это позволяет стабилизировать удельную энергоёмкость разрушения кристаллических структур, варьируя индуктивность и ток разрядного контура при изменении параметров структур системой ключей.

Ключевые слова: *индуктивная плазма; разрушение горных пород; кристаллическая структура; субрезонансный поток; внутренние факторы.*

Relevance. Classical methods of rock fracture (cutting, milling cutting, rotation, explosive, etc.) combined with the latest rock crystalline structure impact technologies provide an opportunity to use internal and external energy sources. However, the patterns of inductive plasma flows impact on crystalline structure have

not been investigated properly. Inductive plasma flows energy regulation reduces specific energy intensity of crystalline structures fracture with the help of n-component fracture system accommodation. That is why it is so important to determine the impact of the plant inductance and discharge circuit current [1] on inductive plasma flows energy. The topic relevance is also confirmed by paragraph 7, article 4 of chapter 2 of the European Parliament and the Council Directive “On energy and energy services end-use efficiency and on reversal of the Council Directive 93/76/EEC“ №1137/2008 of October 22, 2008 [2].

The objective is to determine the impact of the plant inductance and discharge circuit current on inductive plasma flows energy. This will make it possible to regulate the energy in order to accommodate it to changing conditions of the medium.

Material and research results. Structures fracturing is considered at the level of crystalline structures (femtolevel). Crystalline structure oscillations are caused by internal and external factors. The internal factors include:

- gravity,
- rheological properties of crystalline structures,
- strained state of the medium under fracture,
- weak and strong interactions.

The external factors are represented by the changing parameters of inductive plasma flows:

- concentration;
- temperature;
- energy;
- crystalline structure exposure time.

Their regulation on experimental stand is obtained by changing inductance, current, voltage. The features of the stand made it possible to determine inductive plasma physical parameters impact on crystalline structure of the samples prepared for the experimental test.

Plasma flow temperature, T_{pl} , K [3]:

$$T_{pl} = \sqrt[4]{p \cdot y_c^{-1} \cdot q_{mk}}, \quad (1)$$

where $p = 3,14$ – Ludolfian number (Pi), r. u. [4];

$y_c = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – Stefan-Boltzmann constant, $W/(m^2 \cdot K^4)$ [4]; q_{mk} – maximum plasma flow intensity, W/m^2 [3]:

$$q_{mk} = j_m \cdot U_a, \quad (2)$$

where j_m – maximum current density, A/m^2 ; U_a – discharge circuit voltage, V.

Maximum current density, J_m , A/m² [3]:

$$J_m = I_m / (\pi \cdot r_m^2), \quad (3)$$

where I_m – discharge circuit current peak value, A; r_m – maximum plasma flow radius, m [3]:

$$r_m = 0,093 \cdot (I_m)^{1/3} \cdot (t_m)^{1/2}, \quad (4)$$

where t_m – time of decaying current first halfwave, sec.

Having substituted (2) – (4) in (1), plasma temperature:

$$T_{pl} = 4 \sqrt{\frac{I_m \cdot U_a}{y_c \cdot (0,093 \cdot (I_m)^{1/3} \cdot (t_m)^{1/2})^2}}. \quad (5)$$

Discharge circuit current and voltage are determined experimentally and represented in Table 1.

Table 1
Experimental stand parameters with temperature dependence of plasma flow

Discharge circuit voltage, U_a , kV	Current peak value, I_m , A	Time of decaying current first halfwave, t_m , msec	Source	Plasma temperature, T_{pl} , K
4	8	5	Determined experimentally	7557
6	9			8446
8	10			9141

When discharge circuit current increases from 8 to 10 A, plasma flow electrons obtain excess energy. That leads to more frequent collisions between electrons and plasma flow temperature increases linearly from 7557 to 9141 K.

According to the plasma temperature value, plasma flow concentration is determined, N_{pl} , m⁻³ [7]:

$$N_{pl} = p / k \cdot T_{pl}, \quad (6)$$

where $p = 103307,5$ – medium pressure, Pa [8]; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – Boltzmann constant, J/K [6]; angular frequency of plasma flow natural oscillations, ω_{pl} , sec⁻¹ [6]:

$$\omega_{pl} = \sqrt{4 \cdot p \cdot N_{pl} \cdot e^2 / m}, \quad (7)$$

where $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ – electron charge, C [4]; $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ – electron mass, kg [4].

Plasma flow concentration dependency on its temperature and angular frequency change of plasma flow natural oscillations are represented in Table 2.

Table 2

Plasma flow concentration dependency on its temperature and angular frequency change of plasma flow natural oscillations

Plasma flow concentration, N_{pl}, m^{-3}	Plasma flow temperature, T_{pl}, K	Angular frequency of plasma flow natural oscillations, $\omega_{pl} \cdot 10^9, sec^{-1}$
$9,905 \cdot 10^{23}$	7557	0,591
$8,862 \cdot 10^{23}$	8446	0,559
$8,189 \cdot 10^{23}$	9141	0,537

When temperature increases from 7557 to 9141 K, collisions of electrons become more frequent because of the plasma flow internal energy increase. Part of electrons scatter in the medium. Plasma flow concentration decreases inversely and linearly from $9,905 \cdot 10^{23}$ to $8,189 \cdot 10^{23} m^{-3}$. Plasma flow accumulates internal energy and, as a result, angular frequency of its natural oscillations increases from $0,537 \cdot 10^9$ to $0,591 \cdot 10^9 sec^{-1}$ and depends linearly on plasma flow temperature.

Plasma flows internal energy, U, J [7]:

$$U = \frac{r_m^4 \cdot p \cdot c_0 \cdot (r+1) \cdot N_{pl} \cdot V}{2 \cdot (r-1) \cdot p^2 \cdot L \cdot C}, \quad (8)$$

where c_0 – density of unexcited discharge medium, kg/m^3 ; $\gamma = 1,26$ – efficiency index of plasma flows adiabat, r. u. [8]; L – discharge circuit inductance, H; C – discharge circuit capacity, F; l – plasma flow length, m; r – zone radius of pressure wave effective action, m; $V = \pi \cdot r^2 \cdot l$ [9] – plasma flow volume, m^3 .

The downside (8) is failure to take account of plasma flow electronic structure as an internal energy source. Ludolfian number describes not energy but geometric properties. This paper considers crystalline structures fracture as a system of oscillatory circuit with an internal energy source. That is why the impact of crystalline structure energy and angular frequency of natural oscillations is taken into

account. These properties are described by Dirac constant. When changing over to the main index of quantum mechanics – Planck constant – Dirac constant is used [8].

$$h = \hbar \cdot 2\pi, \quad (9)$$

where $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ – Planck constant, J·sec [4]; $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ – Dirac constant, J·sec [10].

Having substituted (9) in (8), plasma flow energy, U, J:

$$U = \frac{r_m^4 \cdot c_0 \cdot (r+1) \cdot N_{pl} \cdot V}{2 \cdot (r-1) \cdot (h/2 \cdot \hbar) \cdot L \cdot C}. \quad (10)$$

Discharge circuit has no capacity, which is a design feature to increase explosion safety and ecological compatibility (absence of capacitors). That is why capacity is expressed through current and voltage [11]:

$$\left(C \cdot U_a^2 \right) / 2 = W_9 = U_a \cdot Q = U_a \cdot I_m \cdot t. \quad (11)$$

According to (11), capacity C of discharge circuit, F:

$$C = 2 \cdot I_m \cdot t / U_a. \quad (12)$$

Having substituted (11) in (10), plasma flow energy, U, J:

$$U = \frac{r_m^4 \cdot c_0 \cdot (r+1) \cdot N_{pl} \cdot V \cdot U_a}{4 \cdot (r-1) \cdot (h/2 \cdot \hbar) \cdot L \cdot I_m \cdot t}. \quad (13)$$

(13) combines the laws of quantum mechanics with classical fracture theory according to Einstein model, when the energy of an inductive plasma elementary particle, ε , J [12]:

$$\varepsilon = \omega_{pl} \cdot \hbar. \quad (14)$$

Results according to (14) are represented in Table 3.

Table 3

Energy of a plasma flow elementary particle

Natural oscillations angular frequency of a plasma flow elementary particle, ω_{pl} $\cdot 10^9, \text{sec}^{-1}$	Energy of a plasma flow elementary particle, $\varepsilon \cdot 10^{-26}, \text{J}$
0,914	6,23

Natural oscillations angular frequency of a plasma flow elementary particle, ω_{pl} $\cdot 10^9, \text{sec}^{-1}$	Energy of a plasma flow elementary particle, $\varepsilon \cdot 10^{-26}, \text{J}$
0,594	5,89
0,537	5,66

Because of plasma flow elementary particles collisions increase, their energy potential increases with the value increase of natural oscillations angular frequency of a plasma flow elementary particle from $0,537 \cdot 10^9$ to $0,914 \cdot 10^9 \text{ sec}^{-1}$. When kinetic energy of elementary particles collisions is transferred, their internal energy increases linearly from $5,66 \cdot 10^{-26}$ to $6,23 \cdot 10^{-26} \text{ J}$.

Having substituted (14) in (13), plasma energy, U, J:

$$U = \frac{r_m^4 \cdot c_0 \cdot N_{pl} \cdot V \cdot e \cdot (r+1) \cdot U_a}{2 \cdot (r-1) \cdot h \cdot \omega_{pl} \cdot L \cdot I_m \cdot t} \quad (15)$$

This mathematical model is introduced for the first time and differs from the existing ones with the fact that it links discharge circuit inductance and current of the electrothermal rock fracturing plant with the characteristics of its operating tool – plasma flow. This allows to reduce specific energy intensity of crystalline structure fracturing by varying inductance and discharge circuit current when changing the structures parameters with the help of switches system. The dependence of plasma flow energy on discharge circuit current and inductance is represented in Table 4.

Table 4

The dependence of plasma flow energy on discharge circuit current and inductance

Energy of inductive plasma flows, PJ	Change of discharge circuit current, A		
	8,0	9,0	10,0
	0,269	0,406	0,555
PJ	Change of discharge circuit inductance, mH		
	11,92	23,84	35,76
	0,269	0,134	0,089

The change of discharge circuit current from 8,0 to 10,0 A leads to plasma channel temperature increase. Plasma channel electrons accumulate internal energy. Energy potential of inductive plasma flow increases linearly from 0,269 to 0,555 PJ. Inductive reactance compresses imaginary volume with charged elementary particles concentrated in it. That is why when plasma flow is discharged internal forces, which resisted compression, lead to internal potential release of the medium. Through

overcoming reactance, discharge circuit inductance increase leads to the impulse internal energy decrease. The flow energy decreases from 0,269 to 0,089 PJ.

Conclusions

1. For the first time the mathematical model of plasma flow energy is introduced, which differs from the existing ones with the fact that it links discharge circuit inductance and current of the electrothermal rock fracturing plant with the characteristics of its operating tool – plasma flow.

2. It is determined that when discharge circuit current increased from 8 to 10 A, inductive plasma flow energy increased from 0,269 to 0,555 PJ due to the increase of circuit energy active component.

3. It is determined that when the discharge circuit inductance increased from 11,92 to 35,76 mH, inductive plasma flows energy decreased from 0,269 to 0,089 PJ due to the loss of energy impulse potential to overcome inductive reactance.

References

1. Система руйнування індуктивною плазмою [Текст] : пат. №27685 Україна: МПК Н 01 S 4/00, Е 21 В 41/00 / Терентьев О. М., ; винахідники і власники О. М. Терентьев, А. Й. Клещов. - № 2-19-14-4235-А ; заявл. 07.10.13 ; опубл. 10.02.14, Бюл. № 3. - 4 с.

2. Директива європейського парламенту і Ради «про ефективність використання енергії та енергетичних послуг, а також про відхилення Директиви Ради 93/76/ЄЕС» від 5 квітня 2006 року 2006/32/ЄС [Текст]. - Введ. 2006-04-27. - 28 с.

3. Баранов, М. И. Приближенный расчет максимальной температуры плазмы в сильноточном канале искрового разряда высоковольтного воздушного коммутатора атмосферного давления [Текст] / М. И. Баранов // Журн. «Технічна електродинаміка». - 2010. - №5. - С. 18-21.

4. Handbook of Physical Constants [Text] / Sydney P. Clark Jr. Editor. – Yale University, New Haven, Connecticut : PUBLISHED BY THE SOCIETY, 1966. - 543 p.

5. Ключарев, А. Н. Введение в физику низкотемпературной плазмы [Текст]: учеб. пособие / А. Н. Ключарев, В. Г. Мишаков, Н. А. Тимофеев; - СПб. : СПбГУ, 2008.- 224 с.

6. Фортов, В. Е. Физика неидеальной плазмы [Текст]: учеб. пособие / В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, И. Т. Якубов ; под общ. ред. М. Б. Козинцова ; - М. : Физматлит, 2004.- 528 с. – ISBN 5-9221-0173-0.

7. Денисюк, Т. Д. Электроразрядная очистка поверхностей технологического оборудования от нежелательных неметаллических отложений [Текст] / Т. Д. Денисюк, А. Р. Ризун, Ю. В. Голень // Журн. «Электронная обработка материалов». - 2007. - №6. - С. 50-52.

8. Коляда, Ю. Е. Возбуждение упругих импульсов мощными плазменными сгустками в акустическом волноводе [Текст] / Ю. Е. Коляда, В. И. Федун // Журн. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. - 2008. - № 4 (6). - С. 260 - 263.

9. Ризун, А. Р. Электроразрядная технология – перспективный путь создания водно-угольного топлива [Текст] / А. Р. Ризун, Ю. В. Голень, Т. Д. Денисюк, И. Р. Ризун // Журн. Наукові праці. Серія: Техногенна безпека. - 2011. - № 151 (163). - С. 20 - 23.

10. Краткий справочник физико-химических величин. Издание десятое, испр. И дополн. [Текст] / Под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой. – СПб. : «Иван Федоров», 2003. - 240 с., ил. ISBN 5-8194-0071-2.

11. Насонов, А. А. Элементы электрических цепей и основные методы их расчета: учебно-методическое пособие по курсу «Электрорадиотехника» для студентов физико-математического факультета специальностей «физика-математика», «математика-физика» [Текст] / А. А. Насонов. - Воронеж. : Воронежский государственный педагогический университет, 2010. - 56 с.

12. Иродов, И. Е. Квантовая физика. Основные законы. [Текст] / И. Е. Иродов. - М. : Высш. школа, 1985. – 271 с.

Стаття надійшла до редакції 18.11.2015 р.

УДК 622:624:550.82

Г.І. Гайко, д.т.н., проф., **В.Г. Кравець**, д.т.н., проф., **В.П. Булгаков**, асп. (НТУУ «КПІ»), **Ю.І. Гайко**, канд. техн. наук, доц. (Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова)

ТРАНЗИТНООРІЄНТОВАНА ПРИРОДНИЧО-ТЕХНІЧНА ГЕОСИСТЕМА «ГЕОУРБАНІСТИКА – ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ»

G. Gaiko, V. Kravets, V. Bulhakov (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»), **Yu. Gaiko** (O.M. Beketov National University of Urban Economic)

TRANSIT ORIENTED NATURAL-TECHNICAL ECOSYSTEMS «GEOURBANISTICS - GEOTECHNICAL ENVIRONMENT»

З системних позицій розглянуті сучасні тенденції розвитку підземного простору мегаполісів; виділена комплексна природничо-технічна геосистема «геоурбаністика – інженерно-геологічне середовище», що відкриває можливості для впровадження системної методології освоєння підземного простору, збільшення об'ємів і оптимізації ризиків підземного будівництва.