С. Е. Донец, с. н. с., к.т.н., В. Ф. Клепиков, директор, д.ф.м.н., член-кор. НАН Украины, В. В. Литвиненко, зам. директора, д.т.н., Е. М. Прохоренко, в. н. с., д.т.н., А. А. Старцев, м. н. с., к.ф.м.н. (Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, г. Харьков, Украина), А. Г. Пономарев, нач. лаборатории, к.ф.м.н., Ю. Ф. Лонин, нач. отдела, д.т.н., В. Т. Уваров, с. н. с., к.ф.м.н. (ННЦ "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина)

# Электрофизические эффекты при воздействии интенсивных электронных пучков на горные породы

Использование концентрированных источников энергии для горных работ является одной из альтернатив механическим и взрывным способам освоения месторождений полезных ископаемых. С развитием средств генерирования мощных электромагнитных импульсов, а именно, увеличения частоты следования импульсов, и создания компактных мобильных установок на основе твердотельных коммутаторов, радиационные технологии в горном деле могут получить дальнейшее развитие. В работе анализируются механизмы воздействия электронного пучка на граниты, а также рассмотрены закономерности изменения химического состава различных горных пород в результате воздействия на них последовательности импульсных сильноточных пучков электронов.

Ключевые слова: сильноточный релятивистский электронный пучок, горные породы, облучение

Застосування концентрованих джерел енергії для гірничих робіт є однією з альтернатив механічним та вибуховим способам освоєння покладів корисних копалин. З розвитком засобів генерування потужних електромагнітних імпульсів, а саме збільшення частоти слідування імпульсів, та створення компактних мобільних установок на основі твердотільних комутаторів, радіаційні технології в гірничій справі можуть в перспективі набути подальшого розвитку. В роботі розглянуто закономірності зміни хімічного складу гірничих порід в результаті впливу на них послідовності імпульсних сильнострумових пучків електронів.

Ключові слова: сильнострумовий релятивістський електронний пучок, гірничі породи, опромінення.

The industrial application of the concentrated radiation energy sources may be considered as an alternative to the mechanical and explosive approaches in the mining of rocks and minerals. In the last decades, the radiation technologies became more advanced due to their development. The generation of the intense electromagnetic impulses has been improved due to an increase in the impulse frequency and availability of the compact mobile facilities built using the solid commutators able to determine for radiation technologies further progress. This work studies the effects of changes in the chemical composition of the grey granite induced by the consequence of the intense high-current electron beam irradiations.

Keywords: high current relativistic electron beam, rocks, irradiation.

#### Постановка проблемы в ощем виде

Среди различных приложений сильноточных релятивистских электронных пучков (СРЭП) достаточно емким и перспективным направлением является их использование в горном деле, в частности при освоении новых методов добычи углеводородов. Следует отметить, что для целей извлечения горно-рудного сырья и залежей полезных ископаемых, могут использоваться источники излучения с различными плотностями потока энергии и различными видами излучения. Например, в качестве концентрированных источников излучения могут использоваться лазеры.

#### Постановка задачи.

Механизмы массопереноса при взаимодействии лазеров с горными породами для бурения нефтяных скважин рассмотрены в работах [1-4]. В работе [3] проанализированы и описаны эффекты, заключающиеся в предварительном облучении горных пород гама-квантами, нейтронными потоками, электронными пучками с целью интенсификации извлечения определенных минералов, что объясняется рядом электрофизических процессов (рост концентрации электронных вакансий, генерацией атомов со свободными валентными связями, изменение величины потенциала [3] и др.).

Особенностью использования источников СРЭП для проходки в горных породах является то, что их действие воспроизводит как механизмы действия концентрированных источников, заключающиеся в испарении и абляции облучаемого материала, так и в стимулировании физико-химических процессов в области прилегающей к границе образующегося отверстия.

Формулирование целей статьи (постановка задачи). В этой связи была поставлена задача установления закономерностей кратерообразования в различных образцах пород, установления элементного состава на поверхности до и после облучения СРЭП, а также уточнения электрофизических эффектов разрушения породы, основанных на кулоновском взаимодействии термализованных электронов.

#### Изложение основного материала исследования. Методика эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на ускорителе ТЭМП-А [5] со следующими параметрами: энергия частиц 0,5 МэВ, ток пучка 5 кА, длительность фронта импульса 5 мкс, полная энергия пучка 2,5кДж. С целью повышения плотности энергии, выделяемой на поверхности, формировался трубчатый пучок. Диаметр пучка составлял 60-70 мм. Толщина стенки пучка – 3 мм. Плотность энергии составляла 250 Дж/см<sup>2</sup>.

Облучаемые материалы – серый среднезернистый гранит. Образцы с линейными размерами порядка 100 мм, толщиной 35 мм облучались в вакууме.

#### Модели кратерообразования

Предполагаемый механизм кратерообразования – термоудар, поскольку энергия пучка, выделяемая в объеме, определяемом диаметром пучка и пробегом электронов, сосредоточена на глубинах порядка 200 мкм. Диссипация энергии пучка происходит вследствие неупругих столкновений, приводящих к ионизации среды и последующей конверсии в тепловую энергию разрушения. Поскольку длительность импульса облучения соизмерима со временем акустической релаксации, то объем, в котором поглощается энергия пучка электронов, не успевает расшириться, что вызывает напряжение сжатия, приводящее к скалыванию приповерхност-

ной области облучаемого образца. В результате из облученного объема распространяются в противоположных направлениях две термоупругие волны сжатия - разрежения.

Установлено, что под действием СРЭП с энергиями частиц до 1 МэВ не наблюдалось образование химически активных веществ. Проводились также исследования химического состава образцов гранита до и после облучения, а также осколков выброшенной породы (табл.1). Как видно из таблицы в результате облучения в наибольшей степени происходит обеднение оксидом железа, а также оксидами калия и кальция.

Экспериментально установлено, что на начальной стадии проходки скорость возникновения углубления составляет 0,5 мм за импульс. На рис1 показан образец серого среднезернистого гранита, облученного серией импульсов трубчатого электронного пучка.

По мере формирования воронки скорость углубления падает до 0,2 мм с одновременным увеличением толщины кольца кратера. Это связано с осаждением определенной доли частиц пучка на стенках кратера.



Рис. 1. Образец серого гранита, облученного последовательностью импульсов трубчатого пучка релятивистских электронов

Последующее увеличение скорости углубления происходит после достижения кольцом кратера величины, превышающей толщину стенки пучка. Подобная закономерность наблюдалась и авторами работы [1] при изучении зависимости удельной энергии объемного выноса массы от плотности энергии, высаживаемой на поверхности.

Этот факт должен быть учтен при разработке технологий бурения с использованием СРЭП, что требует создания соответствующей математической модели.

Рассматривая профиль донной части кратера как периодически изменяющуюся кривую, кривизна которой определяет распределение поглощенной дозы D(r,t) в облучаемом образце запишем выражение

$$D(r,t) = g(t) \int_{0}^{t} d\tau P(r,\tau) , \qquad (1)$$

где *g*(*t*) - геометрический фактор, определяемый профилем донной части кратера;

 $P(r, \tau)$  - мощность поглощенной дозы.

То есть для заданного распределения поглощенной

дозы необходимо найти значение поля излучения (мощность, энергия частиц, сила тока, длительность импульса). Как отмечается в работах [6-7], для описания процессов массопереноса, стимулируемых в твердотельных мишенях сильноточными импульсными РЭП целесообразно использовать гидродинамическую модель.

Принимая во внимание тот факт, что минерал является диэлектриком, среди механизмов разрушения породы следует учитывать электрофизические эффекты, а именно кулоновское взаимодействие между термализованными электронами. Эффект накопления объемного заряда в облучаемой мишени описан в работе [8], применительно к проводящим мишеням. В случае диэлектрика вклад электрофизических эффектов в разрушение мишени будет более весомым. При прохождении трубчатого СРЭП через вещество на своем пути ускоренные электроны испытывают акты взаимодействия с атомами твердого тела. Кроме того, происходит торможение электронов, обусловленное несколькими причинами: взаимодействием движущейся заряженной частицы с полем атомов вещества, объемного заряда самого пучка, ионизированными частицами, сопровождающееся появлением электромагнитного излучения, имеющего непрерывный энергетический спектр, и вторая неупругим рассеянием, в результате которого электронная система твердого тела возбуждается. Для нерелятивистских частиц потери энергии на излучение незначительны, но для релятивистских частиц излучение может быть основным фактором, определяющим потери энергии.

Время релаксации свободного заряда в проводнике можно найти из уравнения непрерывности

$$\nabla \vec{\delta} = -\frac{\partial \rho}{\partial t};$$

$$\nabla \vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \nabla \vec{E} = \rho;$$

$$\vec{\delta} = \sigma \vec{E}; \ \sigma \nabla \vec{E} = -\frac{\partial \rho}{\partial t};$$

$$\frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0} \rho = -\frac{\partial \rho}{\partial t}; \ \rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0}t\right).$$
(2)

Таким образом, плотность заряда со временем падает по экспоненциальному закону. Время релаксации в проводящих средах эта величина составляет

$$\tau = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\sigma} \sim 10^{-18} c$$

Движение электронов в твердотельных мишенях можно описать уравнением переноса Больцмана [9]. Для определения распределения потенциала и термализованых электронов по глубине образца рассмотрим одномерный случай, для которого функция распределения в одночастичном фазовом пространстве f(x, v, t) определяется из уравнения

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x}v + F\frac{\partial f}{\partial v} =$$
(3)

$$= N \left[ f(x, v', t) - f(x, v, t) \right] \frac{d\theta(\alpha)}{d\Omega} \sin \alpha d\alpha d\beta$$

где *N* – концентрация рассеивающих центров; *v*' – некоторое направление движения, составляю-

1

Габлица 1. Химический (	состав поверхности	серого гранита о	до и после обл	іучения [4

Материал	Si <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
После облучения	75.31	14.07	1.46	0.22	1.19	0.35	0.02	2.92	4.02
До облучения	72.51	12.57	1.69	0.25	1.47	0.49	0.01	3.47	6.21

щее угол  $\alpha$  с направлением движения  $\nu$ ;  $\frac{d\theta(\alpha)}{d\Omega} = 1,294 \cdot 10^{-21} \frac{Z(Z+1)}{W^2} \frac{1}{\left(\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + 3,4 \cdot 10^{-3} \frac{Z^{/3}}{W}\right)^2} - \text{диф-}$ 

ференциальное сечение рассеяние электрона при упругих и неупругих соударениях на угол  $\alpha$ ;

β — азимутальный угол в сферических координатах;
 *F* — сила, воздействующая на частицы.

Электрическое поле в электростатическом приближении определяется из уравнения Пуассона

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0} \,. \tag{4}$$

Плотность объёмного заряда можно определить исходя из функции распределения

$$\rho(x,t) = e \int f(x,v,t) dv$$
(5)

Для решения уравнения переноса был использован метод «частица-в-сетке». Выбрав число больших частиц  $N_n$  можно функцию распределения представить в виде

$$f = \sum_{p=1}^{N_p} f_p(x, v, t),$$
 (6)

где 
$$f_p(x,v,t) = n_p \cdot S_x(x-x_p(t)) \cdot S_v(v-v_p(t))$$

- *n<sub>p</sub>* количество физических частиц, представленных в элементе фазового пространства расчетной частицы;
- $S_x$  и  $S_v$  функции формы расчетной частицы.

Используя такое представление функции распределения плотность заряда можно выразить как

$$\rho(x,t) = e \sum_{p=1}^{N_p} n_p S_x(x - x_p(t))$$
(7)

Исходя из проведенного расчета следует, что в мишени, облучаемой трубчатым СРЭП происходит термализация быстрых электронов с их последующей релаксацией в материале. При этом вследствие рассасывания электронов возникает электрический ток, который вызывает также дополнительный нагрев вещества мишени.

Построение динамики распределения температурного поля рис.2 приводился методов конечных разностей. Дифференциально разностная задача решалась с использованием схемы Кранка-Николсона на ортогональной неструктурированной сетке, ранее нами апробированной в работе [10].

Подобная динамика нарастания импульсного теплового поля сопровождается также акустико-ударными воздействиями, что может быть важно для интенсификации добычи полезных ископаемых. Управляемое ударно-акустическое воздействие на метаноносную породу, генерируемое мощным электронным пучком, также может рассматриваться в комплексе с другими техническими мерами [12] как способ предотвращения



гис. 2. Распреоеление температуры в объеме мишени из гранита при облучении сильноточным релятивистским электронным пучком трубчатой формы: a) пространственное распределение в момент максимального достижения температуры; б) распределении температуры в течение нарастания фронта импульса

#### Заключение

Сильноточные импульсные пучки релятивистских электронов являются перспективным инструментом ведения горных работ наряду с другими концентрированными источниками энергии. Эффективность их использования будет определяться появлением на рынке высокочастотных сильноточных коммутаторов. Вместе с тем для оптимизации процесса радиационной деструкции породы является важным понимание физической природы механизмов, влияющих на распределение поглощенной дозы в минералах. Помимо эффекта термического разрушения необходимо принимать во внимание эффект аккумуляции электрического заряда, являющийся дополнительным фактором деструкции. Данный подход является развитием концепции комплексности учета факторов при реализации радиационных технологий [13-14].

#### Список использованной литературы

1. Д.О.Брайен, Р.Грейвс, В.Д.Зворыкин и др. / Взаимодействие импульсных СО и СО2 лазеров с горными породами, характериными для нефтяных месторождений: І. Вынос вещества и импульс отдачи // ФиХОМ.-№2.-2004.-с.16-26

2. Д.О.Брайен, Р.Грейвс, В.Д.Зворыкин и др. / Взаимодействие импульсных СО и СО2 лазеров с горными породами, характерными для нефтяных месторождений: II Газодинамические процессы при лазерно-индуцированной абляции и трансформации ИК-спектров поглощения и отражения горных пород // ФиХОМ.-№1.-2005.-с.47-55

3. И.Л.Комов Радиационная минералогия и геохимия.- Киев:Наукова думка, 2006.- 440 с.

4. N.I.Bazaleev, B.B.Banduryan, T.I.Ivankina,, V.F.Klepikov, V.V.Lytvyenko, Yu.F.Lonin, A.N.Nikitin, A.G.Ponomarev, V.N.Robuk, V.V.Uvarov, V.T.Uvarov / Simulating the radiation transformations in rocks: potential media for radioactive waste disposal // Physics of Particles and Nuclei letter .- 2009, v 6.- N5 pp.417-423

D NICMAS

5. Уваров В.Т., Ткач Ю.В., Гадецкий Н.П., Скачек Г.В., Пономарев А.Г., Кившик В.Ф., Гапоненко Н.И., Козачек А.С., Прасол Е.А. Получение сильноточных пучков микросекундной длительности с высоким к.п.д. // Препринт ХФТИ 84-30, М.:ЦНИИатоминформ, 1984, 13 с.

6. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 1966.-М.: Наука.- 346 с.

7. Романов Г.С., Сузденков М.В. Динамика кратерообразования при действии сильноточных пучков заряженных частиц на металлическую преграду // Доклады АН СССР, 1982.-т.26.-№6.-с.496-499

8. Диденко А.Н., Чистяков С.А., Яловец А.П. Взаимодействие сильноточного релятивистского электронного пучка с веществом // Атомная энергия, т.47.-в.5.-1979.-328-332

9. Birdsall C.K. Plasma physics via computer simulation / C.K. Birdsall, A.B. Langdon // CRC Press, Boca Raton, 2004. -504 p.

10. O.A.Startsev et all. / Simulation of thermal effects of high-current relativistic electron beam on the titanium alloy VT1-0 // Bulletin V.N.Karazin KhNU.-2012.-#1001.iss.2(54).-p. 104-109.

11. V.F. Klepikov, Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev, O.A. Startsev, V.T. Uvarov. Physical and mechanical properties of titanium alloy VT1-0 after high-current electron beam irradiation // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science" (96). 2015, No2, p.39-42.

12. А.Ф.Булат, Г.В.Кирик, В.Г.Шевченко Комплексное решение проблем безопасности при разработке месторождений углеводородов с применением компрессорного оборудования // Геотехнічна механіка. - №119.-2014 с. 3-14.

13. Н.И.Базалеев, В.Ф.Клепиков, В.В. Литвиненко Электрофизические ра-диационные технологии.- Харьков:Акта.-1998.-206 с.

14. Н.И.Базалеев, В.Ф.Клепиков, В.В.Литвиненко Моделирование и про-гнозирование изменений физикохимических свойств материалов под воздействием излучений// Доповіді НАН України.-1997.-№4.-с.82-86.

> пр. Курский, 6, г. Сумы, Украина, 40020 www.nicmas-market.com www.nicmas.com

### продукция

АО «Полтавский турбомеханический завод»



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

## Глуховский завод "Электропанель"

### СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА.

Качественно. Надежно. Долговечно.

УКРАИНА, 41400, Сумская обл. г. Глухов, ул. Индустриальная, 7 тел.: +38 /05444/ 222 27; факс: +38 /05444/ 228 29 e-mail: elpa-info@ukrrosmetall.com.ua

11

len il

BUREAU VERITAS Certification

**ISO 9001**