

# Массоперенос в образцах горных пород под действием экстремальных радиационных факторов

В.Н. Робук<sup>1,4</sup>, А.Н. Никитин<sup>2</sup>, Т.И. Иванкина<sup>2</sup>, В.Т. Уваров<sup>3</sup>, В.В. Уваров<sup>3</sup>, А.Г. Пономарев<sup>3</sup>, Ю.Ф. Лонин<sup>3</sup>, В.В. Литвиненко<sup>4</sup>, В.Ф. Клепиков<sup>4</sup>, Н.И. Базалеев<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория информационных технологий, ОИЯИ, Дубна, <sup>2</sup>Лаборатория нейтронной физики, ОИЯИ, Дубна, <sup>3</sup>ННЦ "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины, <sup>4</sup>Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины

## Введение

Среди различных приложений сильноточных импульсных пучков релятивистских электронов (СИПРЭ) достаточно емким направлением является их использование в горном деле. 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. Механизмы массопереноса при взаимодействии лазеров с горными породами для бурения скважин рассмотрены в работах [1,2]. 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 [4] и др.)

Особенностью использования источников СИПРЭ 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.

В этой связи была поставлена задача установления закономерностей кратерообразования в различных образцах пород и установления элементного состава на поверхности до и после облучения СИПРЭ.

## Методика эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на ускорителе ТЭМП-А [5] со следующими параметрами: энергия частиц 0,5 МэВ, ток пучка 5 кА, длительность импульса 1 мкс, полная энергия пучка 2,5 кДж. 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 – гранит, лабрадорит. Образцы диаметром 90-110 мм, толщиной 20-30 мм облучались в вакууме.

## Модели кратерообразования

Предполагаемый механизм кратерообразования – термоудар, поскольку энергия пучка, выделяемая в объеме, определяемом диаметром пучка и пробегом электронов. Диссипация энергии пучка происходит вследствие неупругих столкновений, приводящих к ионизации среды и последующей конверсии в тепловую энергию разрушения. Поскольку длительность импульса облучения порядка соизмерима со временем акустической релаксации, то объем, в котором поглощается энергия пучка электронов, не успевает расшириться, что вызывает напряжение сжатия, приводящее к скалыванию приповерхностной области облучаемого образца. В результате из облученного объема распространяются в противоположных направлениях две термоупругие волны сжатия.

Установлено, что под действием СИПРЭ с энергиями частиц до 1 МэВ не наблюдалось образование химически вредных веществ. Проводились также исследования химического состава образцов лабрадорита 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 рис. 1 показан образец серого среднезернистого гранита, облученного серией импульсов трубчатого электронного пучка.



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

Таблица 1: Химический состав поверхности лабрадорита до и после облучения

	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
облуч.	69,24	14,46	4,18	0,83	2,48	0,82	0,03	2,98	4,78
необлуч.	67,25	12,83	7,42	0,82	3,29	0,40	0,01	3,27	5,00

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. 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 СИПРЭ, 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

$$D(r, t) = g(t) \int_0^t d\tau P(r, \tau), \quad (1)$$

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, стимулированных в твердых мишенях сильноточными импульсными РЭП целесообразно использовать гидродинамическую модель.

Одним из направлений создания математической модели массопереноса в многокомпонентных облучаемых средах является решения уравнения типа "реакция-дрейф-диффузия"

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f_0 \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + f_0 \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + g_0 \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + g_1 \frac{\partial U}{\partial z} + f_3 + f_4 U + f_6 U^3$$

где  $U$  - динамическая переменная описывающая распределение элемента. Для исследования этой модели необходимо применять специальные методы выходящие за рамки простых линеаризующих подстановок типа Коула-Хопфа. Эти исследования начаты в работе [8]. В отличие от

уравнения Бюргера, в рамках модели КППФ уже оказывается возможным описание генерации устойчивых локальных неоднородностей под воздействием внешнего импульсного источника. Это оказывается возможным именно благодаря кубической нелинейности, которая компенсирует диффузионные и диссипативные процессы.

### Заключение

Сильноточные импульсные пучки релятивистских электронов являются перспективным промышленным и исследовательским средством как для проведения работ по бурению, так и интенсификации извлечения сырья в процессе переработки.

### Список литературы

- [1] Д.О.Брайен, Р.Грейвс, В.Д.Зворыкин и др./ Взаимодействие импульсных СО и СО<sub>2</sub> лазеров с горными породами, характерными для нефтяных месторождений: I. Вынос вещества и импульс отдачи. // . №2.-2004.-с.16-26
- [2] Д.О.Брайен, Р.Грейвс, В.Д.Зворыкин и др. / Взаимодействие импульсных СО и СО<sub>2</sub> лазеров с горными породами, характерными для нефтяных месторождений: II Газодинамические процессы при лазерно-индуцированной абляции и трансформации ИК-спектров поглощения и отражения горных пород. //.-№1.-2005.-с.47-55
- [3] И.Л.Комов *Радиационная минералогия и геохимия.*- Киев:Наукова думка, 2006.- 440 с.
- [4] В.А.Глембоцкий *Основы физикохимии флотацонных процессов.* Изд 2-е.-М.:Недра, 1980.-471 с.
- [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] Робук В.Н., Дидык А.Ю. и др.. Моделирование функции распределения импульсного источника излучения в радиационно-модифицируемой среде // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.*-2005.-№5/2 (17).-с.82-88