

## ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ТОПЛИНЕН ПРЕНОС ПРИ КОМПЛЕКСНО ОХЛАЖДАНЕ ЧРЕЗ КОНВЕКЦИЯ И РАДИАЦИОНЕН ОБМЕН НА СКАЛНИ ОБРАЗЦИ

Майя Вацкичева<sup>1</sup>, Пламен Савов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, mayavack@gmail.com

<sup>2</sup> Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, psavov@mgu.bg

**РЕЗЮМЕ.** Разработването на откритите кариери изисква да се взимат мерки за своевременно отстраняване на газовете и аерозолни замърсители в тяхната атмосфера. Разликата в темпа на охлаждане на различните видове скали, влизащи в състава на подложната повърхност на кариерата, предоставя възможности за естествено проветряване чрез създаване на възходящи въздушни потоци. Във връзка с това интерес представляват физичните характеристики на скалите, определящи модовете на охлаждане на повърхността на кариерата – конвективен, радиационен или комплексен, включващ първите два. В настоящата работа са представени експерименталните резултати от измерванията на темпа на охлаждане на различни скални образци. Направена е оценка на коефициента на топлинен пренос от образците към околната среда според вида скала, както и на зависимостта на този коефициент от размерите на изследваните скални късове. Предвид сложността на физичните процеси, съпровождащи обмена на енергия с околната среда, експерименталното определяне на коефициента на топлинен пренос дава възможност за следващи изследвания на естественото проветряване на открити кариери.

**Ключови думи:** аерозолни замърсители, подложна повърхност, конвективно охлаждане, радиационно охлаждане, коефициент на топлинен пренос

### CALCULATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT FOR COMPLEX COOLING BY CONVECTION AND RADIATION EXCHANGE OF ROCK SAMPLES

Maya Vatzkitcheva<sup>1</sup>, Plamen Savov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, mayavack@gmail.com

<sup>2</sup> University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, psavov@mgu.bg

**ABSTRACT.** The development of quarries requires to take measures for the timely removal of gas and aerosol pollutants in their atmosphere. The distinction in the rate of cooling of different types of rocks that formed the base surface of the quarry provides some opportunities for natural ventilation by creating rising air flows. In this respect it is important to establish the physical characteristics of rocks defining the modes of surface cooling of this career - convection, radiation or complex, including the both of them. This paper shows the experimental results of measurements of the rate of cooling of various rock samples. An evaluation of the coefficient of heat transfer of the samples to the environment according to the type scale and the dependence of this ratio on the size of the studied rocks was made. Considering the complexity of the physical processes accompanying the exchange of energy with the environment, the experimental determination of the coefficient of heat transfer will allow the further research into the natural ventilation of open quarries.

**Key words:** aerosol pollutants, convective cooling, radiative cooling, coefficient of heat transfer

### Въведение

Във връзка с възможността за генериране на естествено проветряване и управление на интензитета и посоката на възходящите въздушни потоци в атмосферата на откритите рудници и кариери, интерес представлява изучаването на термодинамичните процеси на нагриване и охлаждане на подложната повърхност (Бабаев и др, 1987; Бересневич и др, 1990; Никитин и Битколов, 1975; Vodnор et al., 2008). Тези процеси в общия случай са сложна функция от вида на скалите и/или минералите, тяхната големина, разпределението им по склоновете на кариерата и не на последно място и на метеорологичните параметри.

В настоящата работа са представени резултати от изследване на скоростта и начина на охлаждане на различни скални образци. Определени са коефициентите

на топлинен пренос в зависимост от едрината на късовете и вида на скалите. Показано е, че тези коефициенти са сложна функция на излъчващата повърхност и кухините между отделните скални късове.

### Теоретична постановка на разглеждания проблем

Процесите на охлаждане на скалите, влизащи в състава на подложната повърхност на открита кариера, са конвективен и радиационен. При конкретни метеорологични условия в кариерата и в зависимост от физичните характеристики на скалите може да се оцени общото влияние на тези два вида обмен на енергия.

Охлаждането на дадено тяло като комплексен процес се дава с емпирично изведеното диференциално уравнение на Нютон (Incropera, F.P et al.)

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha S(T_{\text{sur}} - T), \quad (1)$$

където  $dQ$  е количеството топлина, пренесено през повърхнината на тялото  $S$  за време  $dt$ .  $T$  е температурата на тялото, а  $T_{\text{sur}}$  – на околната среда.  $\alpha$  е т. нар. коефициент на топлинен пренос, който зависи от геометрията на тялото, състоянието на повърхността му, мода на топлинен пренос и други фактори.

Уравнение (1) може да бъде изразено и чрез топлинния капацитет  $C$  на тялото като се има предвид, че  $Q = CT$ . Това е по-удобно за практически цели, доколкото стойностите му са добре известни за различни вещества, в това число и за разнообразни видове скали.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\alpha S}{C}(T_{\text{sur}} - T) = k(T_{\text{sur}} - T). \quad (2)$$

Това уравнение има решение от вида

$$T(t) = T_{\text{sur}} + (T_0 - T_{\text{sur}})e^{-kt}, \quad (3)$$

където  $T_0$  е началната температура на тялото.

Уравнение (3) показва, че температурата на тялото  $T$  експоненциално намалява, като се стреми да достигне температурата на околната среда  $T_{\text{sur}}$ , и че темпът на охлаждането зависи от съотношението

$$k = \frac{\alpha S}{C}. \quad (4)$$

Колкото стойностите на  $k$  са по-високи, толкова по-бързо е охлаждането.

## Постановка на експеримента

Поради големия брой фактори, от които зависи коефициентът на топлинен пренос  $\alpha$  (респективно от тях зависи и  $k$ ), неговите стойности могат да се определят само експериментално.

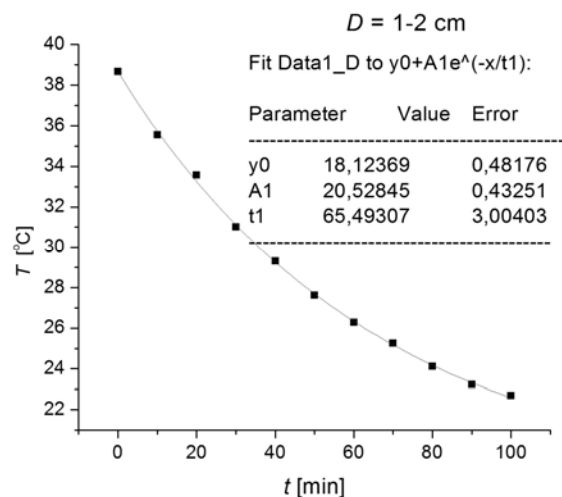
В настоящата работа е представено изследване, проведено в две части: 1) определяне на зависимост на коефициента на топлинен пренос от едрината на скални късове; 2) определяне на коефициента на топлинен пренос за различни видове скали.

### Определяне на зависимостта на $\alpha$ от едрината на скалните късове

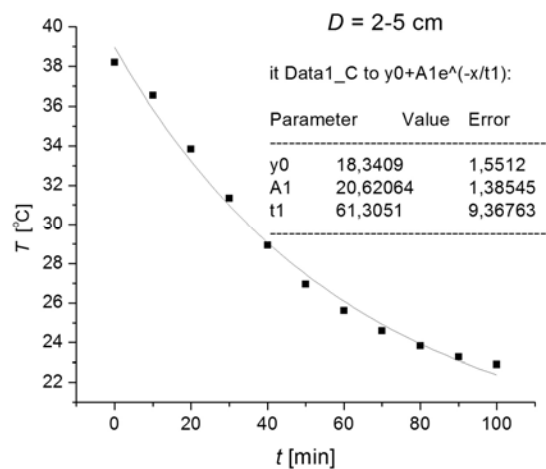
Измерванията са проведени за три еднакви по обем образеца, съставени от скални късове варовик с едрина 1-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm и един монолитен къс - 20 cm. Обемът на всички образци е равен на този на монолитния къс –  $V = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ .

Образците са нагreti до 40 °C и са оставени да се охлаждат при контакт с околния въздух (20 °C). За период от 100 min е измервана температурата им през интервали от 10 min, като е използван термистор - NTC 8.20M.

Експерименталните резултати са представени на Фиг. 1, 2, 3 и 4 по нарастване на диаметра  $D$  на късовете.



Фиг. 1. Охлаждане на варовик – 1-2 cm

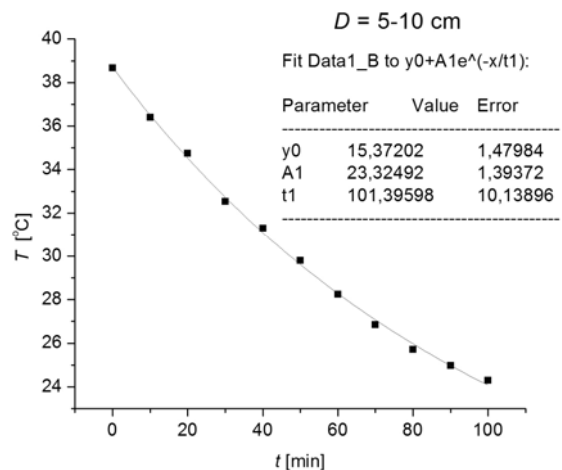


Фиг. 2. Охлаждане на варовик – 2-5 cm

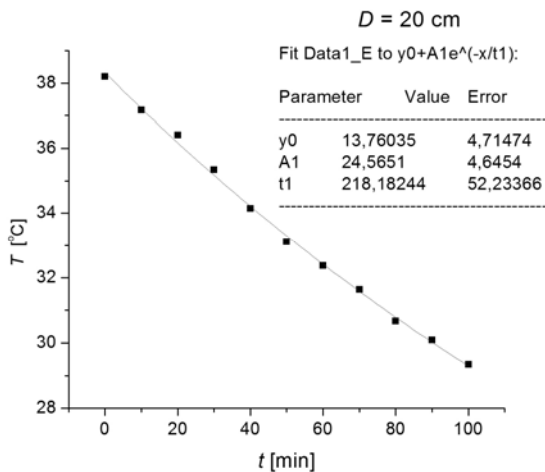
Измерените стойности на температурата са интерполирани с функция от вида

$$y(x) = y_0 + A_1 e^{-x/t_1}, \quad (5)$$

заложена в опциите на програмата Origin, с която са обработвани резултатите.



Фиг. 3. Охлаждане на варовик – 5-10 cm



Фиг. 4. Охлаждане на варовик – 20 cm

От сравнението между изразите (3) и (5) се вижда, че коефициентите в (5) имат следния смисъл

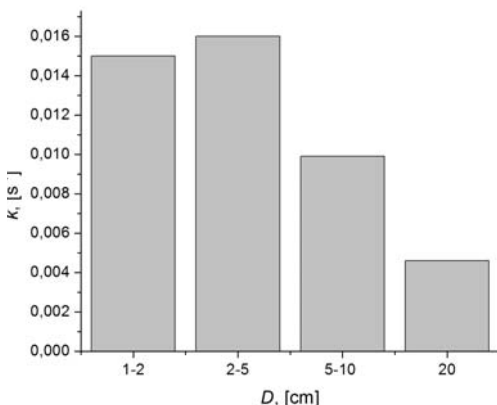
$$y_0 = T_{sur}, \quad (6)$$

$$A_1 = T_0 - T_{sur}, \quad (7)$$

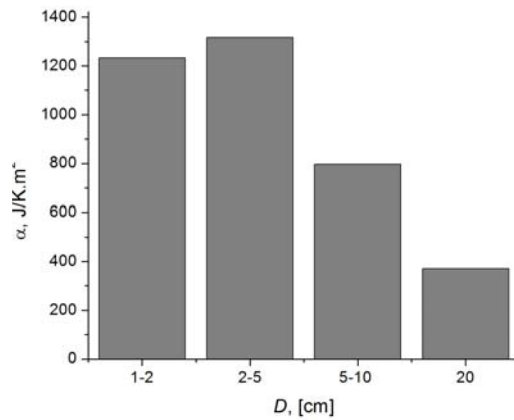
$$t_1 = \frac{1}{k}. \quad (8)$$

Равенства (6) и (7) и стойностите на коефициентите (могат да се видят на фигурите) показват, че има добро съвпадение между теория и експеримент, което е и основание за използване на описания теоретичен модел.

Равенство (8) дава стойностите на коефициента  $k$ , а оттам и на коефициента на топлинен пренос  $\alpha$ . Използвани са следните стойности за топлинния капацитет на варовика и площта на излъчвателната повърхност на образците:  $C = 10,5 \text{ kJ/K}$ ,  $S = 0,13 \text{ m}^2$ . Резултатите са представени на диаграмите на Фиг. 5 и 6. Те показват, че с увеличаване на големината на скалните късове, скоростта на охлаждане бързо намалява. При скални късове с размери 2-5 cm, обаче се наблюдава локален максимум (който може и да е глобален) в скоростта на охлаждане. Този ефект би могъл да се дължи на няколко факта или на тяхното общо влияние – конкретния размер и форма на въздушните кухини между скалните късове, вида на скалата и параметрите на околната среда (температура, влага, въздушни течения). Но за да се каже това със сигурност са необходими допълнителни измервания на тези процеси.



Фиг. 5. Стойности на коефициента  $k$



Фиг. 6. Стойности на коефициента  $\alpha$

### Определяне на $\alpha$ за различни видове скали

Коефициентът на топлинен пренос е определен и за няколко вида скали, като се използва същата методика както в първата част на изследването.

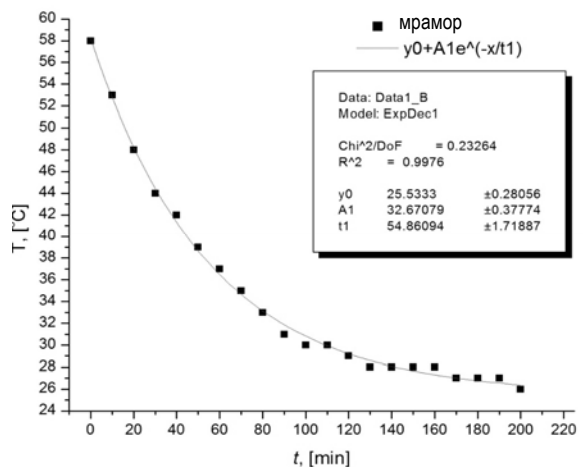
$$\alpha = \frac{kC}{S} = \frac{cm}{St_1}, \quad (9)$$

където  $c$  е специфичния топлинен капацитет, а  $m$  е масата на образеца.

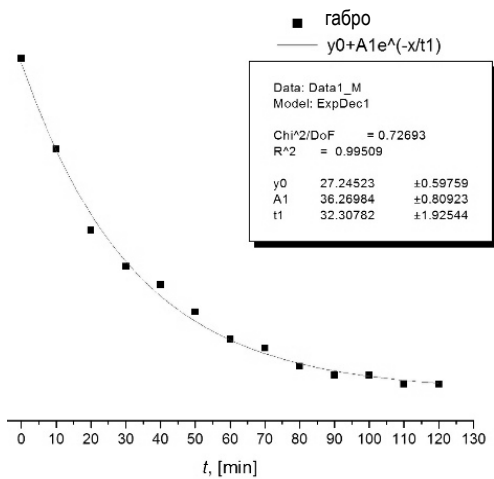
Температурата на околната среда е 24-25 °C. Характеристиките на всеки образец са посочени в Табл. 1. Данните за коефициентите на интерполацията са представени на графиките от Фиг. 7 до Фиг. 11.

Таблица 1

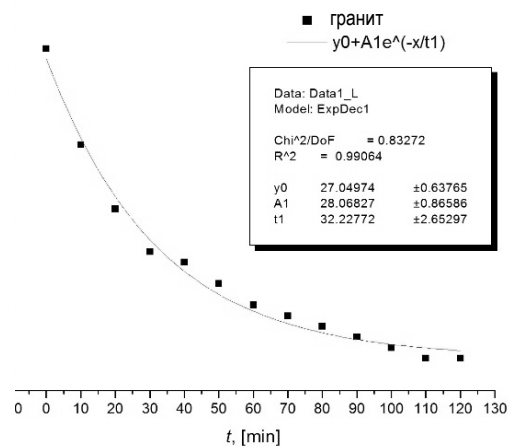
Вид	$m, \text{ kg}$	$S, \text{ m}^2$	$c, \text{ J/kg.K}$
мрамор	1,85	0,0355	420
габро	0,45	0,0165	590
пясъчник	0,5	0,0165	900
вулкански туф	4,6	0,0768	1380
гранит	0,6	0,0165	700



Фиг. 7. Охлаждане на мрамор



Фиг. 8. Охлаждане на габро

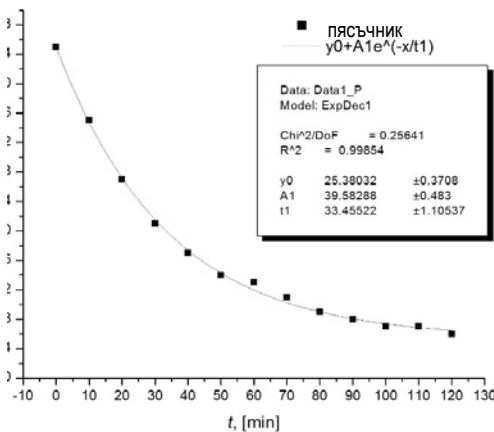


Фиг. 11. Охлаждане на гранит

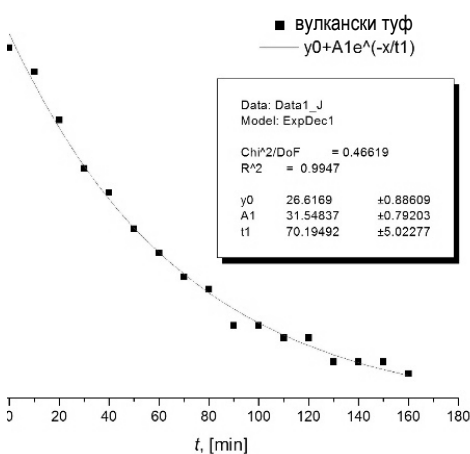
Изчислените стойности на коефициента на топлинен пренос са както следва:

Таблица 2

Вид	$\alpha$ , J/К.м <sup>2</sup>
мрамор	399
габро	229
пясъчник	815
вулкански туф	1178
гранит	790



Фиг. 9. Охлаждане на пясъчник



Фиг. 10. Охлаждане на вулкански туф

## Заклучение

От анализа на експерименталните резултати и свързаните с тях моделни пресмятания е показано, че коефициентът на топлинен пренос, определящ скоростта на охлаждане на скалите, е сложна функция на охлаждащата повърхност.

## Литература

- Бабаев, В., В. Ф. Будымка, Т. А. Сергеева. *Теплофизические свойства горных пород*, - М., Недра, 1987. – 156 с.
- Бересневич, П., В. Михайлов, С. Филатов. *Арология карьеров*, – М., Недра, 1990. – 280 с.
- Никитин, В. С., Н. З. Битколов. *Проверивание карьеров*. М., Недра, 1975. – 258 с..
- Bodnor, T., Benez, and Kozel, K. 2008. Numerical simulation of flow and pollution dispersion in the area of opencast coal mine. – *American Institute of Physics, Conference proceedings*. 1048, 100-103.
- Incropera, F.P., D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, USA, VI<sup>th</sup> edition - 1070 p.

Статията е рецензирана от проф. Вили Лилков и препоръчана за публикуване от кат. „Физика“.