

## Түйіндеме

Мақалада кара металлургияның шикізаттық базасын құрайтын берік тау жыныстарын бұзуға арналған алмасты инструментті пайдалану тиімділігі жайлы мәселелер қарастырылған. Қазақстандағы қоңыртеміртас шикізатын өңдеу үшін алмастан жасалған берік (нық) кесетін құрал пайдаланады. Мақалада екі табақшадан тұратын алмас сіңдірілген сегментімен жабдықталған аспаптың құрылымы қарастырылған. Екі табақшаның арасында еркін айналатын шығыршық түрінде жасалған омырылтқыш (опырғыш) орналастырылған. Шығыршықтың шет жақ беттері және оған сәйкес шығыршық бунақтары қиғаш томпақ пішінінде орындалған, ал шығыршық пен табақшаның қабысуы цилиндр формалы болып келеді. Кескіш табақшалар тау машинасының атқарушы органына бекіту түйінімен бекітілген. Тау машинасының кесу органы саңылау целигін тиімді омыртуға мүмкіндік береді. Алмасты аспаптың құрылымын (конструкциясын) әрі қарай жетілдіру барысындағы мақсат: оның кез келген машина немесе аспаптар үшін өндірістік жағдайда қолдануы және қуатты (энергияны) үнемдей отырып, ұзақ уақыт ішінде тұрақты да апатсыз жұмыс істеуіне мүмкіндік туғызу.

**Түйінді сөздер:** алмас аспабы, омырылтқыш (опырғыш), саңылау целигі, белағашқа күш салу, тозу.

## Summary

The article examines the feasibility of diamond tool application for the destruction of rock that is the steel industry raw material base. The use of diamond instrument possessing such important properties as durability and abrasive firmness allows to apply it as a toolpiece for development of limonites in Kazakhstan. The article examines the construction of diamond instrument, consisting of two disks, equipped by impregnated diamond segments. Between them splitter executed as a freely running around ring is placed. The butt end surfaces of ring and corresponding butt end surfaces of circular channel of disks are executed with the bevel ledges and an conjugation between rings and disk has a form of cylindrical surface. Cutting disks are fastened on the working axle of executive organ of mining machine by a fastener assembly. Device for destruction of inter-crack pillar by disk cutting organ of mining machine will allow increasing efficiency of inter-crack pillar splitting off. Further development of the diamond tool's design was aimed to its application in the industry for any object (machine or tool) that would provide a stable and trouble-free operation for a long time with minimal energy consumption.

**Key words:** diamond instrument, splitter, inter-crack pillar, axial effort, wear.

*Поступила 18.04.2014.*

УДК 622.775

**Комплексное использование  
минерального сырья. № 2. 2014.**

*Л.Б. САБИРОВА*

*Казахский Национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы  
sabirova\_leyla\_b@mail.ru*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИФФУЗИОННОГО РАСТВОРЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЙ ЗАЛЕГАНИЯ ПЛАСТОВ**

В статье рассмотрены физические модели диффузионного растворения и фильтрационного переноса металлов для сложных условий, оцениваемых критериями надежности. Такие модели отсутствуют, и их следует скорректировать. Полученные путем теоретического анализа фундаментальные формулы для вычисления времени диффузионного растворения или выщелачивания металлов рекомендуются для практических расчетов при проектировании и управлении технологических систем подземного скважинного выщелачивания. Так, были рассчитаны основные параметры: время диффузионного растворения куска руды диаметром  $d$ , см;  $\varepsilon_n$  – проектное значение коэффициента извлечения металла для некоторых месторождений (Тохтазан, Пустынное и для месторождений сульфидных руд). Выведены новые формулы

для вычисления времени диффузионного растворения металлов от влияющих факторов: среднего размера куска руды -  $\ell$ , коэффициента диффузии -  $D_n$ , коэффициента извлечения металла -  $C_{пр}$  при его выщелачивании. Из формул следует, что наиболее сильно время диффузионного выщелачивания металла -  $t_0$  зависит от размера куска руды, и пропорционально квадрату линейного размера куска.

**Ключевые слова:** уран, подземное скважинное выщелачивание, диффузионное растворение, математическое моделирование, руда, извлечение металла.

**Введение.** Подземное скважинное выщелачивание металлов (ПСВ) относится к высоким геотехнологиям. К настоящему времени, например, уран в объеме 27 тыс. тонн из 50 тыс. тонн мировой добычи извлекается из недр этим самым надежным, экологически чистым и экономически эффективным способом.

Но при этом, многие весьма доступные гидрогенные месторождения урана в стране уже достаточно отработаны. Переход на отработку более сложных по геологическим признакам и технологическим критериям объективно должен сопровождаться научным обоснованием параметров и характеристик геотехнологий. Этой весьма актуальной теме и решению главных теоретических задач в области диффузионного растворения металлов посвящена статья.

**Теория и методика расчета.** Поскольку исследуемая технология не может быть экспериментально изучена в лабораторных условиях на модели и тем более на реальных объектах, то единственным методом изучения такой системы остается математическое моделирование.

Основная расчетная модель для физического процесса диффузионного растворения металла, полученная ранее в [1], была сведена к уравнению:

$$t_0 = \frac{d^2 \ln \frac{11,2}{\varepsilon_n \cdot \pi^2}}{\pi^2 \cdot D_n}, \text{ сут}, \quad (1)$$

где  $t_0$  – время диффузионного растворения куска руды диаметром  $d$ , см;  $\varepsilon_n$  – проектное значение коэффициента извлечения металла, доли ед.;  $D_n$  – коэффициент эффективной диффузии, см<sup>2</sup>/сут.

Из формулы (1) следует, что время растворения металла зависит прежде всего от размеров  $d$  и от  $D_n$ .

Понятно, что первая величина  $d$  относит-

ся к разряду неуправляемых параметров при подземном скважинном выщелачивании металлов.

Вторая величина  $D_n$  в принципе также относится к неуправляемому параметру.

Физические модели диффузионного растворения и фильтрационного переноса металлов рассматривались ранее для совершенных скважин [1]. Для сложных условий, оцениваемых многочисленными критериями, такие модели отсутствуют, в этой связи нами дано новое решение этой задачи в продуктивных пластах.

**Обсуждение результатов.** Переходим к моделированию физического процесса диффузионного растворения металла в реагенте.

В соответствии с законом диффузии Фика запишем модель в виде дифференциального уравнения [2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right),$$

где  $C(x, y, z, t)$  – искомая функция распределения металла в пространстве по времени  $t$ ;  $D_x$ ;  $D_y$ ;  $D_z$  – коэффициенты диффузии по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Для наших исследований интерес представляет одномерный (линейный) закон диффузии, который описывается уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Следует искать решение (2) в виде функции  $C(x, t)$  при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} C(x, t) &= C_0 \text{ при } 0 < x < 1 \text{ и } t = 0; \\ C(x, t) &= 0 \text{ при } x = \ell \end{aligned}$$

где  $C_0$  – исходная концентрация металла, т/см<sup>3</sup>;

$C(x, t)$  – текущая концентрация металла по оси  $x$  за время  $t$ ;  $\ell$  – размер куска руды, см;  $t$  – время диффузии, сут.

Имеется решение такого уравнения (2) в виде бесконечного ряда:

$$C(x, t) = \frac{4C_o}{\pi} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{2j+1} \text{Csch}\left(\frac{2j+1}{x}\right) \times \exp\left\{-\left[(2j+1)\frac{\pi}{x}\right]^2 D_n \cdot t\right\}. \quad (3)$$

Примем для дальнейшего анализа, что в относительных единицах  $C_o = 1$ , а  $C_{np} = 0,75$ , т.е. конечное значение диффундирующего металла (растворения) до 75 %, то можно получить простейшее решение, ограничившись первым членом быстро убывающего ряда (3):

$$\frac{C_{np}}{C_o} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_n \cdot t}{\ell^2}\right). \quad (4)$$

При заданном  $D_n \cong 0,864 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/сут из (4) находим время диффузионного выщелачивания металла:

$$t_o = \frac{\ell^2 \cdot \ln \frac{8C_o}{C_{np} \cdot \pi^2}}{\pi^2 \cdot D_n}, \quad \text{сут}, \quad (5)$$

где  $\ell$  – средний диаметр куска руды, см;

$C_o = 1$  и  $C_{np} \cong 0,7 \div 0,75$  – относительные единицы содержания металла в руде и извлечения его из руды;

$D_n$  – эффективный коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/сут, для металлов [1]

$$D_n \cong 0,864 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{сут}.$$

Анализ формулы (5) показывает, что эта формула обладает некоторыми недостатками. Первое –  $C_{np} \cong 0,7 \div 0,75$ , т.е. весьма узкий, хотя и практически правильный диапазон изменения коэффициента извлечения металла. Второе – при увеличении  $C_{np}$  от 0,7 до 0,75 время  $t_d$  будет уменьшаться, что является противоречием.

Исходя из этих замечаний, запишем формулу (5) в виде:

$$t_o = \frac{\ell^2 \cdot \ln \alpha \frac{8C_o}{C_{np} \cdot \pi^2}}{\pi^2 \cdot D_n}, \quad \text{сут}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – некоторый параметр,  $\ell > 0$ , который определяется статистическим путем или экспериментально по схеме.

Для определения  $\alpha$  принимаем  $C_{np} = 0,7$ , тогда формулу (6) запишем:

$$t_o = \frac{\ell^2 \cdot \ln \alpha \cdot 1,159}{\pi^2 \cdot D_n}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) имеем:

$$\ln 1,159 \cdot \alpha = \frac{t_o \cdot \pi^2 \cdot D_n}{\ell^2}. \quad (8)$$

Из уравнения (8) легко определить искомый параметр  $\alpha$  из уравнения:

$$\alpha = \frac{1}{1,159} e^{\frac{t_o \cdot \pi^2 \cdot D_n}{\ell^2}}. \quad (9)$$

Следовательно, если известно время диффузионного выщелачивания –  $t_o$  и размер куска  $\ell$ , то по формуле (9) легко подсчитать параметр  $\alpha$ .

Например, для руды месторождения Тохтазан имеем:  $\ell = 2$  см,  $D_n = 0,864 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/сут,  $t_o = 36$  сут.

$$\alpha = \frac{1}{1,159} \exp\left(\frac{36 \cdot \pi^2 \cdot 0,864}{4 \cdot 10^3}\right) = \frac{1,079}{1,159} = 0,93.$$

Следовательно, для условий руды месторождения Тохтазан имеем уравнение:

$$t_o = \frac{\ell^2 \cdot \ln 0,93 \frac{8 \cdot C_o}{C_{np} \cdot \pi^2}}{\pi^2 \cdot D_n}, \quad \text{сут}. \quad (10)$$

Кроме того, величину  $\alpha$  можно рассчитать, если известна функция извлечения металла  $\alpha(t)$  в виде:

$$\varepsilon(t) = 1 - \frac{1}{e^{C_1 t_\phi}}, \quad (11)$$

где  $C_1$  – параметр, определяемый статистически.

Пусть имеем для условий месторождения Тохтазан  $\varepsilon(t) = 0,65$ ;  $t_\phi = 40$  сут. Из уравнения (11) имеем:

$$0,65 = 1 - \frac{1}{e^{C_1 t_\phi}}, \quad (12)$$

откуда, решая (12) относительно  $C_1$ , получим:

$$e^{C_1 t_\phi} = \frac{1}{1 - 0,65}$$

или

$$C_1 = \frac{1}{t_\phi} \ln 2,87,$$

$$C_1 = \frac{1,049}{40} = 0,0262.$$

При этом уравнение (11) запишется в виде:

$$\varepsilon(t) = 1 - \exp(-0,0262t). \quad (13)$$

Пусть задано  $t = 20$  сут, тогда  $\varepsilon(t) = 0,48$ , т.е.  $\approx 50\%$  за 20 суток.

Рассмотрим более сложную руду месторождения Пустынное, для нее  $t_\phi = 340$  сут;  $\varepsilon(t) = 0,3$  или  $30\%$ , тогда имеем:

$$C_1 = \frac{1}{340} \ln \frac{1}{1 - 0,3} = 0,00104.$$

Для извлечения металла до  $\varepsilon = 0,5$  получим формулу:

$$t_\phi = \frac{\ln \frac{1}{1 - 0,5}}{0,00104} = 666 \text{ суток},$$

т.е. в принципе и сульфидные руды можно выщелачивать, только срок существенно растягивается.

Определим параметр  $\alpha$  для руд месторождения Пустынное по формуле (9):

$$\alpha = \frac{1}{1,159} e^{\frac{340 \cdot \pi^2 \cdot 0,864}{6,25 \cdot 10^3}} = 1,37.$$

Тогда формула (6) для определения  $t_\phi$  для руд Пустынного будет:

$$t_\phi = \frac{\ell^2 \cdot \ln \frac{11 \cdot C_o}{C_{np} \cdot \pi^2}}{\pi^2 \cdot D_n}, \text{ сут.} \quad (14)$$

Если соорудить штабель из руды с фракцией 0,5 см и ниже, то время сократится:

$$t_\phi = \frac{0,25 \cdot 2223}{0,864 \cdot \pi^2} = 65 \text{ суток},$$

а при крупности  $\ell = 0,6$ :

$$t_\phi = \frac{0,36 \cdot 2223}{0,864 \cdot \pi^2} = 94 \text{ суток}.$$

Выведены новые формулы (5), (6) для вычисления времени диффузионного растворения металлов от влияющих факторов: среднего размера куска руды -  $\ell$ , коэффициента диффузии -  $D_n$ , коэффициента извлечения металла -  $C_{np}$  при его выщелачивании.

Наиболее сильно на время диффузионного выщелачивания -  $t_\phi$  металла влияет размер куска руды, которое пропорционально квадрату линейного размера куска.

Для проектирования технологических систем выщелачивания металлов одним из главных параметров является время диффузионного растворения и извлечения конкретного металла до проектного значения коэффициента извлечения. Диффузионное растворение металлов теоретически освещено в известной монографии П. Шьюмана [2] и других работах [2] и искать расчетные модели для определения времени диффузионного растворения металла для идеальных форм рудного или иного сырья.

Рассмотрим дифференциальное уравнение (2) второго закона Фика при одномерной диффузии в пластине:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (15)$$

где  $C(x, t)$  – концентрация вещества  $C$  как функция одной координаты –  $x$  и времени  $t$ ;  $D_n$  – эффективный коэффициент диффузии.

Если принять, что  $D_n$  не зависит от времени и от координаты  $x$ , то известно решение (15) в виде бесконечного сходящегося ряда:

$$C(x, t) = \frac{4C_o}{\pi} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{2j+1} Csch\left(\frac{2j+1}{h}\right) \times \\ \times \exp\left\{-\left[(2j+1)\frac{\pi}{h}\right]^2 D_n \cdot t\right\}, \quad (16)$$

где  $Cschx = \frac{2}{e^x - e^{-x}}$ ;  $C_o$  – начальная концентрация металла в пластине –  $h$ ;  $x$  – глубина диффузии.

При выщелачивании практически невозможно определить концентрацию полезного компонента – металла на различной глубине куска. Для получения общего количества растворенного металла необходимо знать среднюю концентрацию металла  $\bar{C}$  в идеальной пластине толщиной –  $h$ . Для этого необходимо взять интеграл от функции (16) по  $h$  в виде:

$$\bar{C}(t) = \frac{1}{h} \int_0^h C(x, t) \cdot dx. \quad (17)$$

Подставляя в (17) значение  $C(x, t)$  (16) после интегрирования и необходимых преобразований получим новый ряд:

$$\bar{C}(t) = \frac{8C_o}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \exp\left\{-\left[\frac{(2j+1)\pi}{h}\right]^2 D_n \cdot t\right\}. \quad (18)$$

Рассмотрим функцию ряда –  $\bar{C}(t)$  до 3-го члена включительно, тогда получим:

$$\bar{C}(t) = \frac{8C_o}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{h^2}\right) D_n \cdot t + \\ + \frac{1}{9} \exp\left(-\frac{9\pi^2}{h^2}\right) D_n \cdot t + \\ + \frac{1}{25} \exp\left(-\frac{25\pi^2}{h^2}\right) D_n \cdot t + \\ + \frac{1}{49} \exp\left(-\frac{49\pi^2}{h^2}\right) D_n \cdot t + \dots \quad (19)$$

С погрешностью не более 3% можно из (19) записать уравнение:

$$\bar{C}_{np}(t) = \frac{11,2C_o}{\pi^2} \exp\frac{\pi^2 D_n \cdot t}{h^2}. \quad (20)$$

Решая уравнение (20) относительно времени  $t$  выщелачивания до  $\bar{C}_{np}$ , получим:

$$t_{\partial} = \frac{h^2 \cdot \ln \frac{11,2C_o}{\bar{C}_{np} \cdot \pi^2}}{\pi^2 \cdot D_n}, \text{ сут}, \quad (21)$$

где  $h$  измеряется в сантиметрах;  $D_n$  измеряется в см<sup>2</sup>/сут;  $C_o$  и  $\bar{C}_{np}$  – измеряются в относительных единицах, поэтому  $C_o = 1$ , а  $\bar{C}_{np}$  равно проектному коэффициенту извлечения металла из руды, т.е.  $\bar{C}_{np} = \epsilon_n$ .

Формула (21) является основополагающей для определения времени диффузионного растворения металла при выщелачивании из пластин.

Рассмотрим численный пример.

Пусть дано:  $h = 2$  см,  $C_{np} = 0,7$ ,  $D_n = 0,864 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/сут [2] тогда:

$$t_{\partial} = \frac{4 \cdot \ln \frac{11,2 \cdot 1}{0,7 \cdot \pi^2}}{\pi^2 \cdot 0,864 \cdot 10^{-3}} = 227 \text{ суток}.$$

Если, например, крупность кусков породы уменьшить вдвое, т.е.  $h = 1$  см, то время сократится в четыре раза и составит  $t_{\partial} = 57$  суток, а при  $h = 0,5$  см всего 14 суток. Из этого простого примера следует, что размер куска рудного сырья является главным показателем при диффузионном растворении.

Рассмотрим также решение задачи определения времени диффузионного растворения для шара с радиусом –  $r$ , см. В сферической системе координат второй закон Фика имеет вид [2]:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} = 0. \quad (22)$$

Известно решение этого уравнения для малых времен в виде для среднего значения  $\bar{C}(r)$ :

$$\bar{C} = \frac{1}{r} \int_0^r F(r) \cdot dr = C_o \exp\left[-\left(\frac{t}{r}\right)^{\frac{3}{2}}\right], \quad (23)$$

где

$$r \approx \frac{r_e^2}{2D_n} \left(\frac{C_{np}}{C_o}\right)^{\frac{1}{3}}. \quad (24)$$

Подставляя (24) в уравнение (23) и решая его относительно времени  $t_{\partial}$ , получим для шара:

$$t_{\partial} = \frac{r_e^2}{2D_n} \sqrt[3]{\frac{C_{np}}{C_o}} \cdot \sqrt[3]{\left(\ln \frac{C_o}{C_{np}}\right)^2}, \text{ сут}.$$

или иначе



$$t_{\partial} = \frac{r_e^2}{2D_n} \left( \frac{C_{np}}{C_o} \right)^{1/3} \cdot \left( \ln \frac{C_o}{C_{np}} \right)^{2/3}. \quad (25)$$

Сопоставим теперь численные значения для пластины (21) и шара для только что рассмотренного примера.

По формуле имеем при  $\ell = 2$  см, тогда  $r = 1$  см:

$$t_{\partial} = \frac{1}{2 \cdot 0,864 \cdot 10^{-3}} \left( \frac{0,7}{1} \right)^{1/3} \cdot \ln \left( \frac{1}{0,7} \right)^{2/3} = 256 \text{ суток.}$$

При  $r = 0,5$  см,  $t_{\partial} = 64$  сут; и при  $r = 0,2$  см,  $t_{\partial} = 16$  суток.

Из приведенных данных следует, что формулы (21) и (24), описывающие процесс диффузионного растворения пластины и шара дают практически одинаковый результат. Из формул следует сделать выводы.

**Выводы.** Полученные нами впервые новые расчетные формулы надежно позволяют определить время диффузионного растворения металла в продуктивном пласте. Этот главный технологический параметр является определяющим для проектирования рудников подземного скважинного и кучного выщелачивания металлов.

### Түйіндемe

Бұл мақалада күрделі жағдайлардағы металдардың диффузиялық еруі және фильтрациялық тасымалдануы қарастырылған. Қазіргі кезде мұндай үлгілер болмағандықтан, оны қарастырып толықтыру қажет. Металдарды сілтілеудегі және диффузиялық ерітінділерді анықтау уақыты үшін теоретикалық сараптамалар арқылы алынған фундаменталды формулаларды жобалау кезіндегі тәжірибелік есептеулер барысында пайдалануға, сонымен қатар жерасты ұңғылап сілтілеудегі технологиялық жүйені басқаруға ұсынылады. Сонымен, кен кесектерінің диффузиялық ерігіштігі диаметр ( $d$ , см), кейбір кеніштерден (Токтазан, Пустынное және сульфидті кеніштер) металдардың алыну коэффициенттері-  $\varepsilon_n$  жобалық мәндердің негізгі параметрлері есептелді. Металдардың диффузиялық еруінің ұзақтығына әсер ететін факторлар: кен кесегінің орташа өлшемін -  $\ell$ , диффузия коэффициентін -  $D_n$ , металды шаймалау арқылы шығару коэффициентін -  $C_{np}$  — анықтайтын жаңа формулалар шығарылды. Бұл формулалардан металдарды диффузиялық шаймалау-  $t_{\partial}$  кен кесегінің өлшеміне тәуелді екені және кесектің ұзындық өлшемінің квадратына пропорционалды екені анықталды.

**Түйінді сөздер:** уран, жер асты ұңғымаларды сілтілеу, диффузиялық еруі.

### Summary

In the article the physical models of diffusion dissolution and filtrational transfer of metals for the complicated conditions evaluated by reliability criteria are considered. Such models not exist and should be corrected. So, key parameters have been calculated: time of diffusion dissolution of a piece of ore with diameter  $d$ , cm;  $\varepsilon_n$  - rated value of metal extraction coefficient for some deposits (Tokhtasan, Pustynnoed and for deposits of sulphide ores). New formulae for calculation of metals diffusion dissolution time from influencing factors are deduced: average size of ore piece -  $\ell$ , coefficient of diffusion -  $D_n$ , coefficient of metal extraction -  $C_{np}$  at its leaching. It follows from formulae, that time of metal diffusion leaching -  $t_{\partial}$  strongly depends on the size of ore piece and is proportional to a square of the linear size of a piece.

**Keywords:** uranium, underground borehole leaching, diffusion dissolution, mathematical modeling, ore, metal extraction.

Полученные путем теоретического анализа фундаментальные формулы для вычисления времени диффузионного растворения или выщелачивания металлов рекомендуются для практических расчетов при проектировании и управлении технологических систем подземного скважинного выщелачивания.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Рогов А.Е., Рыспанов Н.Б. Математические основы геотехнологии. Алматы: FORTRESS, 2007. – 367 с.
- 2 Шьюман П. Диффузия в твердых телах. - М.: Наука, 1968. – 320 с.
- 3 Рогов Е.И., Язиков В.Г., Рогов А.Е. Математическое моделирование в горном деле. – Алматы: Lem., 2002. – 204 с.

### REFERENCES

- 1 Rogov A.E., Ryspanov N. B. *Matematicheskie osnovy geotekhnologii*. Almaty: FORTRESS, 2007. 367. (in Russ.)
- 2 Sh'yuman P. *Diffuziya v tverdykh telakh*. M., Nauka. 1968. 320 (in Russ.)
- 3 Rogov E.I., Yazikov V. G., Rogov A.E. *Matematicheskoe modelirovanie v gornom dele*. Almaty: Lem, 2002, 204 (in Russ.)

Поступила 11.05.2014.