

Для малых частиц основную роль играет поверхность, так что  $G^0 = \sigma \cdot S = \sigma \times \pi d^2$ ,  $\sigma$  – поверхностное натяжение. В качестве функции отклика системы на приложенное разрушающее напряжение возьмем функцию  $1/(\sigma_T - \sigma_M)$ . Тогда уравнение (1) примет вид:

$$\sigma_T = \sigma_M + C\sigma d^{-1/2}. \quad (3)$$

Уравнение (3) по форме совпадает с уравнением Холла-Петча. Однако коэффициенты пропорциональности в обеих формулах различаются. В нашем случае поведение предела текучести малых частиц определяется также величиной их поверхностного натяжения  $\sigma$ . Для малых  $d$  А.И. Русанов получил асимптотическую линейную зависимость:

$$\sigma = Kd. \quad (4)$$

Здесь  $K$  – коэффициент пропорциональности. Формула (4) получена на основе термодинамического рассмотрения и должна быть применима к малым объектам различной природы. В этом случае, уравнение (3) принимает вид:

$$\sigma_T = \sigma_M + CKd^{1/2}. \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает обратный эффект по отношению к уравнению Холла-Петча. Экспериментально этот эффект обнаружен для многих металлических частиц с размером менее 10 нм.

#### СТАЦИОНАРНОЕ ТЕПЛОЕ ПОЛЕ БЕСКОНЕЧНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ НАНОМЕТРОВОЙ ТОЛЩИНЫ

Юров В.М., Лауринас В.Ч.,  
Гученко С.А., Завацкая О.Н.

*e-mail: kolesnikov.vladimir@gmail.com*

Во всех руководствах по расчету тепловых полей тонких покрытий космической и авиационной техники исходят из классических уравнений теплопроводности, где коэффициент теплопроводности считается постоянной величиной. Однако при толщине пленки менее 50–100 нм в ее физических свойствах начинают сказываться размерные эффекты. Рассмотрим задачу о тепловом поле неограниченной пластины тол-

щиной  $\delta$ . Ограничимся стационарным случаем. Тогда уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0. \quad (1)$$

В классическом случае  $\lambda = \text{const}$ , а в нашем  $-\lambda = \lambda_0(1 - \alpha/\alpha + x)$  [1]. Здесь  $\alpha$  размерный фактор. С учетом размерного эффекта, уравнение (1) приводится к виду:

$$\frac{xd}{x + \alpha} \frac{T}{dx} = \frac{C_1}{\lambda_0}. \quad (2)$$

Здесь  $C_1$  – постоянная интегрирования. Решение уравнения (2) имеет вид:

$$T(x) = \frac{C_1}{\lambda_0} (x + \alpha \ln x) + C_2. \quad (3)$$

Если в (1)  $\lambda = \text{const}$ , то имеем классическое решение задачи:

$$T(x) = C_1 x + C_2. \quad (4)$$

В отличие от классической задачи (4) в уравнении (3) появляется логарифмический член. Это приводит к расходимости в начале координат. Поэтому граничные условия нужно задавать не при  $x = 0$ , а при  $x = \lambda_{\text{дб}}$  – длине де Бройлевской волны электронов.

#### Список литературы

1. Юров В.М., Лауринас В.Ч. и др. // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 7. – С. 88–93.

#### ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ

Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А.,  
Завацкая О.Н.

*e-mail: kolesnikov.vladimir@gmail.com*

Расчет коэффициента теплопроводности производился по формуле:

$$\lambda(r) = \lambda_0 \cdot \left( 1 - \frac{d}{d+r} \right).$$

Здесь  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности массивного образца, значение которого взято из справочника [1];  $d$  – размерный параметр, значение которого получено нами в работе [2]. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Коэффициент теплопроводности чистых металлов (М) [1]

| М  | $\lambda_0$ ,<br>Вт/(м·К) |
|----|---------------------------|----|---------------------------|----|---------------------------|----|---------------------------|----|---------------------------|----|---------------------------|
| Li | 84,8                      | Sr | –                         | Sn | 65                        | Cr | 67                        | Ni | 92                        | Ho | 16                        |
| Na | 142,0                     | Ba | –                         | Pb | 35                        | Mo | 162                       | Ce | 11                        | Er | 15                        |
| K  | 79,0                      | Al | 207                       | Cu | 395                       | W  | 130                       | Pr | 13                        | Tm | 17                        |
| Rb | 58,2                      | Ga | 33                        | Ag | 418                       | Mn | 8                         | Nd | 17                        | Yb | 35                        |
| Cs | 35,9                      | In | 88                        | Au | 310                       | Tc | 51                        | Sm | 13                        | Lu | 16                        |
| Be | 182                       | Tl | 47                        | Zn | 111                       | Re | 50                        | Eu | 14                        | –  | –                         |
| Mg | 165                       | Si | 167                       | Cd | 93                        | Fe | 75                        | Gd | 11                        | –  | –                         |
| Ca | 98                        | Ge | 60                        | Hg | 8                         | Co | 71                        | Dy | 11                        | –  | –                         |

Таблица 2

Коэффициент теплопроводности наночастиц металлов размером 1 нм

| M  | $\lambda(r)$ ,<br>Вт/(м·К) |
|----|----------------------------|----|----------------------------|----|----------------------------|----|----------------------------|----|----------------------------|----|----------------------------|
| Li | 35,3                       | Sr | –                          | Sn | 22                         | Cr | 14                         | Ni | 25                         | Ho | 2                          |
| Na | 45,8                       | Ba | –                          | Pb | 10                         | Mo | 22                         | Ce | 2                          | Er | 2                          |
| K  | 16,8                       | Al | 65                         | Cu | 120                        | W  | 14                         | Pr | 2                          | Tm | 2                          |
| Rb | 11,2                       | Ga | 17                         | Ag | 102                        | Mn | 2                          | Nd | 2                          | Yb | 5                          |
| Cs | 5,8                        | In | 34                         | Au | 72                         | Tc | 8                          | Sm | 2                          | Lu | 2                          |
| Be | 65                         | Tl | 14                         | Zn | 44                         | Re | 6                          | Eu | 2                          | –  | –                          |
| Mg | 40                         | Si | 28                         | Cd | 32                         | Fe | 18                         | Gd | 1                          | –  | –                          |
| Ca | 12                         | Ge | 12                         | Hg | 4                          | Co | 19                         | Dy | 1                          | –  | –                          |

Из таблиц видно, что теплопроводность частиц размером 1 нм уменьшается в 3–5 раз и при размерах в 50 нм они уже мало отличаются от массивных образцов.

**Список литературы**

1. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. академика И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.  
2. Jurov V.M. // Eurasian Physical Technical journal. – 2011. – Vol. 8, № 1(15). – P. 10–14.

*Экологические технологии*

**ОПЫТ РЕКУЛЬТИВАЦИИ  
ЗАГРЯЗНЕННОГО НЕФТЬЮ  
СУХОДОЛЬНОГО ЛУГА В ПОДТАЙГЕ  
ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

Казанцева М.Н., Гашев С.Н.

ГОУ ВПО «Тюменский государственный  
университет», Тюмень,  
e-mail: MNKazanitseva@yandex.ru

В декабре 1994 г. на участке магистрального нефтепровода Усть-Балык – Альметьевск, в 100 км к юго-востоку от г. Тюмени произошел аварийный разлив нефти на площади около 3 га. С геоботанических позиций участок находится в подзоне подтайги Западной Сибири и представлен суходольным злаково-разнотравным лугом. Концентрация нефтепродуктов в почве составила более 60 массовых процентов, что по существующей классификации оценивается, как сильная [1]. Сохранность живого напочвенного покрова на загрязненной территории не превышала 5%.

Летом 1995 года на загрязненной территории был проведен комплекс рекультивационных работ. После сбора нефти участок был обработан отсыпан слоем плодородного грунта в смеси с торфом и сапропелем. Биологический этап рекультивации включал в себя внесение органических (куриный помет) и минеральных (комплексное) удобрений и посев фитомелиорантов из смеси злаков (2 вида) и бобовых трав (4 вида). За восстановлением биоценоза рекультивированного участка в течение последующих лет велись мониторинговые наблюдения [2, 3].

К концу 1997 года концентрация нефтяных углеводородов в верхнем слое почвы снизилась в 120 раз до 0,50%, что соответствует нормативам допустимого остаточного содержания нефтепродуктов в почве после рекультивации; в июле 2009 года этот показатель составил 0,20%.

Процессе формирования растительного покрова проходил за счет высеянных трав-мелиорантов, семян сорных растений, внесенных с плодородной почвой, а также за счет семян различных растений, налетевших с сопредельных территорий. На протяжении периода наблюдений наблюдалось перераспределение роли различных эколого-ценотических групп растений. Уже через год после рекультивации на участке образовался устойчивый травостой с проективным покрытием 85%. В этот момент сообществе доминировали сорные виды растений с эксплерентным типом стратегии, характеризующийся высокой семенной продуктивностью, но укороченным жизненным циклом. Летом 1997 г. доминирующая роль в сообществе, как по количеству видов, так и по показателю проективного покрытия, перешла от рудеральных однолетников к многолетним луговым видам с большим участием сеяных трав-мелиорантов. В дальнейшем доля последних существенно снизилась. В настоящее время растительный покров представлен густым многоярусным травостоем с высотой верхнего яруса более 120 см и общим проективным покрытием травянистой растительностью 83,5%. В составе травостоя отмечен 61 вид растений. Коэффициент флористического сходства с фоновой территорией составляет 70%.

**Список литературы**

1. Гашев С.Н., Казанцева М.Н., Соромотин А.В. Методика оценки фитопригодности нефтезагрязненных территорий (с рекомендациями к рекультивационным работам). – Тюмень, 1992. – 13 с.  
2. Казанцева М.Н., Гашев С.Н. Мониторинговые исследования на участке аварийного разлива нефти в подтаежной зоне Западной Сибири // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. – 2000. – № 1. – С. 134–140.  
3. Казанцева М.Н., Черкашина М.В., Талипова Е.В. Формирование растительного покрова на участке рекультивации нефтяного загрязнения в подтайге Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. – 2011. – № 6. – С. 25–29.