

УДК 523.36.536.2+023+63.533.590

АСТРОНОМИЯ

Член-корреспондент АН СССР В. В. РЖЕВСКИЙ, Е. А. ДУХОВСКОЙ,
Н. Т. КРУГЛОВ, Р. Г. ПЕТРОЧЕНКОВ, А. А. СИЛИН, В. В. ШВАРЕВ

**ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ГРУНТА «ЛУНЫ-20»
И ЕГО ЗЕМНЫХ АНАЛОГОВ**

Основными составляющими исследуемого реголита материковой зоны Луны, доставленного на Землю автоматической лунной станцией «Луна-20», являются породы анортозитового типа. Для сравнения исследовались анортозит Новомиргородского района (Украина) и андезитовый песок рыхлых отложений сопки Ключевской (Камчатка). Соответствие гранулометрического состава андезитового песка среднему гранулометрическому составу лунного грунта (¹) контролировалось с помощью ситового анализа. Образцы анортозита измельчались на шаровой мельнице до получения соответствующего гранулометрического состава.

Определение коэффициента температуропроводности a и удельной теплоемкости c лунного грунта и аналогов в зависимости от температуры проводилось методом мгновенного источника тепла и периодического ввода тепла на установке, описанной в работе (²). Коэффициент теплопроводности λ рассчитывался по формуле $\lambda = c\rho a$, где ρ — плотность рыхлого материала. Нагреватель, предназначенный для создания теплового импульса, использовался также при малой мощности для нагревания всего образца. Термомары, устанавливаемые в различных частях образца, позволяли обеспечить контроль за равномерностью распределения температуры в нем перед подачей в образец теплового импульса. Тепловые потери, неизбежные при применении метода периодического ввода тепла (определение удельной теплоемкости), учитывались с помощью проведения эксперимента на рыхлом материале, аналогичном исследуемому, с известной теплоемкостью.

Результаты определений c , a , λ лунного грунта в зависимости от температуры в вакууме (10^{-5} тор) и гелии при плотности $\rho = 1$ г/см³ приведены в табл. 1, а его аналогов при различной плотности — в табл. 2. Изменение удельной теплоемкости при изменении температуры незначительно как у лунного грунта, так и его аналогов; характер изменения коэффициента температуропроводности с температурой у лунного грунта и аналогов подобен, хотя a отличается по абсолютной величине, что, по-видимому, обусловлено главным образом отличием в плотностях исследуемых проб.

Таблица 1

	T, °C								Примечание
	25	30	35	40	45	50	60	85	
c , дж/(г·град)	0,811	0,813	0,819	0,822	0,823	0,831	0,833	0,836	} Вакуум, 10 ⁻⁵ тор
$a \cdot 10^8$, м ² /сек	0,322	0,335	0,352	0,368	0,388	0,402	0,427	0,468	
$\lambda \cdot 10^3$, вт/(м·град)	2,61	2,72	2,88	3,02	3,19	3,34	3,56	3,91	
$a \cdot 10^8$, м ² /сек		11,30	12,85	13,20	15,70	16,80			} Гелий при нор- мальном давлении
$\lambda \cdot 10^3$, вт/(м·град)		92,0	102,8	105,1	129,5	139,8			

T, °C	Анортозит мелкораздробленный					Андезитовый песок				
	$\rho=1,1 \text{ г/см}^3$		c	$\rho=1,53 \text{ г/см}^3$		$\rho=1,29 \text{ г/см}^3$		c	$\rho=1,62 \text{ г/см}^3$	
	$a \cdot 10^3$	$\lambda \cdot 10^3$		$a \cdot 10^3$	$\lambda \cdot 10^3$	$a \cdot 10^3$	$\lambda \cdot 10^3$		$a \cdot 10^3$	$\lambda \cdot 10^3$
25	0,413	3,36	0,740			0,675	6,46	0,745	0,98	11,8
35	0,448	3,67	0,746	0,661	7,70	0,700	6,75	0,749	1,09	12,4
45	0,491	4,06	0,750	0,682	7,98	0,810	7,90	0,753	1,28	15,4
55	0,509	4,20	0,752	0,713	8,40	0,870	8,50	0,756	1,36	16,6
65	0,548	4,56	0,760	0,795	9,39	0,925	9,08	0,758	1,63	20,8
100						1,128	11,21	0,770	2,00	26,0
150						1,347	13,58	0,781	2,39	30,2

Примечание. Размерность a , c и λ такая же, как в табл. 1.

Определяя дисперсный материал как объект, где отсутствует дальний порядок, рассмотрим его по Займану ⁽³⁾ как неоднородно преломляющую среду. Если пренебречь взаимодействием фотонного и фононного газов (как показано в работе ⁽⁴⁾, это справедливо для небольших градиентов и нормальных температур), коэффициент теплопроводности дисперсного материала в вакууме λ_z можно представить как сумму коэффициентов теплопроводности фотонного $\lambda_{\text{фот}}$ и фононного $\lambda_{\text{фон}}$ газов.

Рассмотрим теплоперенос фононами. Полагая, что длина упругой волны много меньше размера частиц, и принимая за длину корреляции средний размер частиц L , оценим согласно ⁽³⁾ величину свободного пробега фонона l выражением

$$l = \pi^{-5/2} \frac{\bar{v}^2}{(\delta v)^2} L, \quad (1)$$

где \bar{v} — средняя скорость звука в дисперсной среде, $\bar{\delta v}$ — средний скачок скорости на поверхности раздела частиц,

$$\bar{\delta v} = (v_0 - \bar{v}),$$

v_0 — средняя скорость продольных волн высокой частоты в зернах дисперсного материала.

Определим величину \bar{v} , исходя из хаотичности упаковки частиц, выражением

$$\bar{v} = \{ [K_1 (\rho' / \rho_0)^{1/2} + K_2 (1 - \rho / \rho_0)] [1 / v_0 + \Delta t_k \cdot 1 / L] \}^{-1}, \quad (2)$$

где ρ_0 — плотность материала при «нулевой» пористости, K_1 , K_2 — коэффициенты форм и упаковки частиц соответственно, Δt_k — время задержки упругой волны на границе частиц.

Используя модель Дебая с учетом выражения (1), получим для фононной составляющей коэффициента теплопроводности

$$\lambda_{\text{фон}} = 1/3 \pi^{-5/2} a_0 c_0 \rho \bar{v}^3 / (v_0 - \bar{v})^2 L, \quad (3)$$

где c_0 — удельная теплоемкость материала.

Так как выражение (1) может содержать довольно большую ошибку в численном множителе, значение постоянного коэффициента a_0 определяется путем подбора.

Рассмотрим далее теплоперенос фотонами. Выразим $\lambda_{\text{фот}}$ согласно ⁽⁵⁾:

$$\lambda_{\text{фот}} = 16/3 n_R^2 \sigma T^3 l', \quad (4)$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана, T — температура, °K, l' — длина свободного пробега фотона, n_R — коэффициент преломления.

Таблица 3

T, °C	$\rho=1,1 \text{ г/см}^3$		$\rho=1,53 \text{ г/см}^3$	
	$\lambda_{\text{эксп}} \cdot 10^3$	$\lambda_{\text{расч}} \cdot 10^3$	$\lambda_{\text{эксп}} \cdot 10^3$	$\lambda_{\text{расч}} \cdot 10^3$
25	3,36	3,51	—	—
35	3,67	3,655	7,70	7,48
45	4,06	3,80	7,98	7,66
55	4,20	3,955	8,40	7,90
65	4,56	4,13	9,39	8,10

Примечание. Размерность λ , как в табл. 1.

Можно принять, что $n_R^2 \approx \epsilon$, где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость дисперсной среды в инфракрасной части спектра.

Ограничимся в качестве первого приближения случаем, когда длина электромагнитной волны $\ll L$. Выразим длину пробега фотона аналогично длине пробега фонона (выражение (1))

$$l' = \pi^{-5/2} b_0 \frac{(c/\epsilon^{1/2})^2}{(c/\epsilon_0^{1/2} - c/\epsilon^{1/2})^2} L, \quad (5)$$

где c — скорость света в вакууме.

Величину ϵ можно выразить через относительную диэлектрическую проницаемость материала в том же диапазоне частот с «нулевой» пористостью ϵ_0 по формуле логарифмического средневзвешенного

$$\epsilon = \epsilon_0^{\rho/\rho_0}.$$

Тогда фотонная составляющая коэффициентов теплопроводности с учетом (5) выразится как

$$\lambda_{\text{фот}} = \frac{16}{3\pi} \pi^{-5/2} b_0 \frac{\sigma T^3 \epsilon}{(1 - (\epsilon/\epsilon_0)^{1/2})^2} L, \quad (6)$$

где b_0 — параметр подбора, аналогичный коэффициенту a_0 в формуле (3).

На основании полученных выражений (3) и (6) был произведен расчет $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\text{фон}} + \lambda_{\text{фот}}$ мелкодробленого анортозита со средним размером зерен 10–15 мкм в вакууме при различной плотности и температуре. Для расчетов были приняты следующие осредненные величины: $v_0 = 5,5$ км/сек; $\epsilon_0 = 3,5$, $\rho_0 = 3,2$ г/см³, $K_1 = 1,67$; $K_2 = 2,846$, $a_0 \approx b_0 \approx \pi$. Величина Δt_k оценена по сравнению скорости звука в дисперсных средах в вакууме и плотном материале аналогичного минерального состава ($\Delta t_k = 0,7 \cdot 10^{-7}$ сек.). Расчетные и экспериментальные данные приводятся в табл. 3.

Довольно близкое соответствие экспериментальных и расчетных значений λ_{Σ} свидетельствует о возможной близости предложенной и реальной модели теплопереноса в мелкодисперсных средах.

Всесоюзный научно-исследовательский институт оптико-физических измерений

Поступило
30 V 1974

Московский горный институт

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Мооп, т. 6, № 3–4, 250 (1973). ² А. П. Дмитриев, Е. А. Духовской и др., ДАН, т. 199, № 5, 1036 (1971). ³ Дж. Займан, Электроны и фононы, М., 1962. ⁴ F. Engelmann, H. F. Schmidt, Nucl. Sci. and Eng., v. 24, 317 (1966). ⁵ Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Статистическая физика, М., 1963.