

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 8. С. 380–385  
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 8, pp. 380–385

Научная статья  
УДК 621.9.042  
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=183184>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/TNWVVSJ>

## Расчет нестационарного теплового состояния бурового устройства для взятия проб лунного грунта

А.А. Матушкин<sup>1</sup>✉, П.А. Козедра<sup>1</sup>✉, А.В. Кургузов<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ, Москва, Россия

✉ [matushkinaa@mai.ru](mailto:matushkinaa@mai.ru), ✉ [kpa\\_777@mail.ru](mailto:kpa_777@mail.ru), ✉ [mandigit@newmail.ru](mailto:mandigit@newmail.ru)

**Аннотация.** В работе представлены тепловые расчеты бурового устройства для забора образцов лунного грунта. В частности, для выбора оптимального режима работы и типа бурения проведено два типа расчетов: выбор мощности для алмазного бурения и его расчет, расчет тепловыделения при алмазном бурении. По результатам работы получены необходимые мощности, необходимые для бурения и оптимальные режимы работы бура, с точки зрения обеспечения минимально заданного градиента температур в процессе работы.

**Ключевые слова:** реголит, буровое устройство, лунный грунт, нестационарный теплообмен, бурение, ANSYS, алмазное бурение

**Для цитирования.** Матушкин А.А., Козедра П.А., Кургузов А.В. Расчет нестационарного теплового состояния бурового устройства для взятия проб лунного грунта // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 8. С. 380–385. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=183184>

Original article

## Calculation of the non-stationary thermal state of a drilling device for sampling lunar soil

A.A. Matushkin<sup>1</sup>✉, P.A. Kozedra<sup>1</sup>✉, A.V. Kurguzov<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Moscow aviation institute (national research university) (MAI), Moscow, Russia

✉ [matushkinaa@mai.ru](mailto:matushkinaa@mai.ru), ✉ [kpa\\_777@mail.ru](mailto:kpa_777@mail.ru), ✉ [mandigit@newmail.ru](mailto:mandigit@newmail.ru)

**Abstract.** The paper deals with the issues of drilling lunar soil using a new design of a diamond soil intake device. The calculation of heat release in the soil intake device was calculated in two stages, at the first stage, heat flows were found in the diamond bit itself, and at the second stage, the search for the optimal operating mode of the entire drilling device as a whole was carried out, subject to the maximum allowable temperature rise at the rock intake site of no more than 10 degrees by kelvin. The calculation of the first stage was carried out according to empirical formulas, and the second stage was calculated using finite elements in the ANSYS Workbench software product, namely, using the transient thermal module.

---

© Матушкин А.А., Козедра П.А., Кургузов А.В., 2024

As a result of the calculation, an optimal algorithm for the operation of the drilling device was found, provided that the drill rotates at 3000 rpm and uses a bit made of steel 12X18H10T with 6 abrasive belts. The resulting algorithm of operation is a periodic switching on and off of the drilling device, turning off the drilling device is necessary to cool down the soil intake area. The operation algorithm consists of three inclusions of 20, 15 and 10 seconds with a frequency of 100 seconds and a subsequent period of a longer stop for 235 seconds. Thus, work has been carried out to justify the possibility of using a new design of a soil intake device for drilling lunar rock.

**Keywords:** regolith, drilling device, lunar soil, unsteady heat transfer, drilling, ANSYS, diamond drilling

**For citation.** Matushkin A.A., Kozedra P.A., Kurguzov A.V. Calculation of the non-stationary thermal state of a drilling device for sampling lunar soil. *Thermal processes in engineering*. 2024, vol. 16, no. 8, pp. 380–385. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=183184>

## Введение

В настоящее время изучение Луны с помощью автоматических космических аппаратов является приоритетным направлением фундаментальных космических исследований. В Федеральной космической программе России на 2016-2025 годы планируется осуществление широкомасштабных исследований района Южного полюса Луны с использованием как орбитальных, так и посадочных автоматических аппаратов (проекты «Луна-Глоб», «Луна-Ресурс-1», «Луна-Грунт»).

Использование грунтозаборного устройства (ГЗУ) в составе посадочного аппарата позволяет значительно повысить эффективность исследования поверхности естественного спутника Земли. Основными задачами ГЗУ является внедрение, отбор, хранение и транспортировка грунта для дальнейших исследований.

Так как одной из основных миссий грунтозаборного устройства является анализ грунта, то градиент температур на ГЗУ в процессе работы не должен превышать 10 градусов, что и является основным ограничением при алмазном бурении. Потом одним из ключевых расчетов при проектировании ГЗУ с алмазным бурением является расчет нестационарного теплообмена в процессе работы устройства.

## Параметры лунного грунта

В работе рассматривается использование бурения при помощи высокоскоростных алмазных коронок и резание за счет истирание породы.

В связи с применением данного вида проведения буровых работ требуются различные типы расчетов, а именно:

- выбор мощности для алмазного бурения и его расчет;
- расчет тепловыделения при алмазном бурении.

Буровое устройство предназначено для взятия проб лунного грунта, поэтому для начала список характерных параметров данного грунта, имеющих принципиальное значение для последующих расчетов [1, 2].

Измеренные величины объемного веса лунного реголита (от 1,0 до 2,0 г/см<sup>3</sup>) с интервалом наиболее часто встречающихся значений (1,4–1,8 г/см<sup>3</sup>), весьма мало зависят от региональной геологической ситуации (море–материк). Можно лишь отметить, что в силу большего удельного веса вещества морского грунта, средние значения его объемного веса обычно ближе к верхней границе последнего интервала, а материкового – к нижней. Усредненные характеристики величин объемного веса реголита как функции глубины, обобщенные по данным всех используемых методов, таковы [3] см. табл. 1:

Таблица 1. Плотность реголита по толщине

Глубина Z, см	$\rho$ г/см <sup>3</sup>
0-15	1,50±0,05
0-30	1,58±0,05
30-60	1,74±0,05
0-60	1,66±0,05

Так же для дальнейшего расчета, особенно шнекового бурения важны когезионный свой-

ства, составляющие по данным различных лунных экспериментов величины когезии ( $c$ ) и углов внутреннего трения ( $\varphi$ ) лежащие в следующих интервалах предельных значений:  $c = 0,1-1,0$  кН/м<sup>2</sup>;  $\varphi = 30-50^\circ$ . Следует ожидать, что с глубиной величины когезии реголита будут возрастать. Действительно, самое высокое значение ( $c = 1,3$  кН/м<sup>2</sup> при  $\varphi = 46,5^\circ$ ) получено для реголита с глубины 2,18 м. Данные по сопротивлению сдвига и коэффициентам трения представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сопротивления сдвига и коэффициенты трения

Параметр	Значение
Сопротивление сдвигу при разных сжимающих напряжениях, кг/см <sup>2</sup>	
0,052	0,034 кг/см <sup>2</sup>
0,238	0,169 кг/см <sup>2</sup>
0,550	0,302 кг/см <sup>2</sup>
Коэффициенты трения	
Магниевый сплав	0,3
Дюралюминий	0,45
Титановый сплав	0,35
Нержавеющая сталь	0,25
Конструкционная сталь	0,30
Сплав ВК-8	0,30

Параметры по теплопроводности и теплоемкости реголита представлены в табл. 3.

Таблица 3. Теплофизические свойства реголита

Параметр	Значение
Теплопроводность	0,0005–0,01465 Вт/м×К
Теплоемкость	741,06–837,36 Дж/кг×К

Амплитуда колебаний лунного грунта в зависимости от глубины представлена в табл. 4, усредненная зависимость теплоемкости и теплопроводности от температуры представлена в табл. 5.

Таблица 4. Амплитуда колебаний температур лунного грунта

Глубина (мм)	Амплитуда температур (С)
Поверхность	280
70	30
140	3

Таблица 5. Зависимость теплоемкости и теплопроводности от температуры

Температура К	Теплопроводность Вт/М×С	Теплоемкость Дж/кг×С
100	0,0007	275,7
150	0,0008	433,9
250	0,0011	642,4
300	0,0014	758,1
350	0,0017	848,9

### Определение параметров алмазного бурения

При бурении предлагается использовать алмазную головку с высокими скоростями вращения, пример такого применения представлен, например в [4, 5].

Конструктивная схема буровой коронки для ГЗУ представлена на рис. 1.

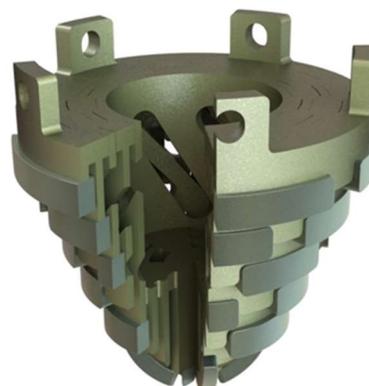


Рис. 1. Конструктивная схема бурового устройства

Примеры расчета тепловыделения при бурении приводятся в работе [6]. Согласно этой работе получаем распределение температур по рабочей поверхности:

$$T(r) = \frac{\mu N}{mC}r - \frac{h_e}{2mCa}r^2 \quad (1)$$

Тепловыделение при работе бура равняется:

$$Q = \mu N \omega r - \frac{h_e}{a} \omega r^2 \quad (2)$$

где  $N$  – сила нормального давления,  $r$  – расстояние от центра рабочей поверхности бура до резца,  $m$  – масса резца,  $c$  – его удельная теплоемкость,  $\mu$  – коэффициент трения,  $a$  – коэффициент истираемости,  $h_e$  – эффективная глубина резания,  $\omega$  – частота вращения об/мин.

В дальнейшем при расчетах используются исходные параметры представленные в табл. 6, а так

же применяется материал для резца хладостойкая сталь 12X18H10T с плотностью  $7920 \text{ кг/м}^3$ ;  $E = 1,98E5 \text{ МПа}$ ;  $\mu = 0,3$ ;  $\alpha = 17E-6 \text{ 1/К}$ ;  $\lambda = 15 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$ ;  $C = 462 \text{ Дж/(кг}\times\text{град)}$ ;  $\sigma_B = 540 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_{0,2} = 196 \text{ МПа}$ .

Таблица 6. Исходные параметры расчета тепловыделения резца

Параметр	Значение
коэффициент трения	0,25
сила нормального давления, Н	1
удельная теплоемкость резца, Дж/кг×К	900
эффективная глубина резания, м	0,0001
коэффициент истираемости	0,00005
частота вращения, об/мин	3000
Время затрачиваемое на эффективную глубину реза, с	1

Исходя из уравнения 2 получены значения тепловыделения для рабочих элементов бура (см. табл. 7 и рис. 2).

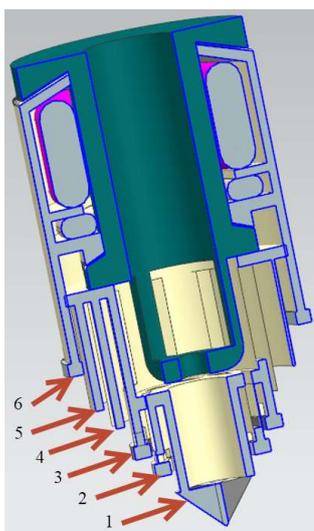


Рис. 2. Схема расчета бурового устройства

Таблица 7. Значения тепловыделения для бура на различных диаметрах (см. рис.2)

Название	Радиус рабочего элемента	Тепловыделение (Вт)
Рабочий радиус 1, м	0,001	0,375
Рабочий радиус 2, м	0,0124	4,419
Рабочий радиус 3, м	0,0238	8,075
Рабочий радиус 4, м	0,0352	11,341
Рабочий радиус 5, м	0,0466	14,218
Рабочий радиус 6, м	0,058	16,704
Итого		55,13

### Расчет оптимального времени работы бурового устройства

С целью анализа времени работы буровой установки и выдерживания температурного градиента в месте грунтазобора не более 10 градусов, был проведен численный расчет нестационарного теплообмена.

Расчет проводился в осесимметричной постановке, на рис. 3 представлена расчетная сеточная модель ГЗУ.

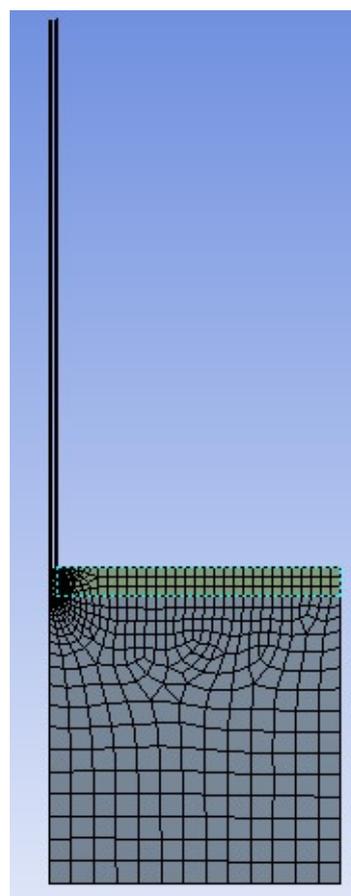


Рис. 3. Сеточная модель расчета нестационарного теплообмена ГЗУ

Высота бура при расчете равнялась 2 метра, диаметр 0,058 м, размер грунта метр на метр. Свойства материала грунта и бура представлены ранее в разделе «параметры лунного грунта». В расчетной схеме все стенки адиабатны, между грунтом и буром идеальный тепловой контакт, тепловой поток 55,13Н (см. табл. 7) приложен на торце бурового устройства.

На рис. 4 представлены максимальные температуры и время подведения тепла к буру.

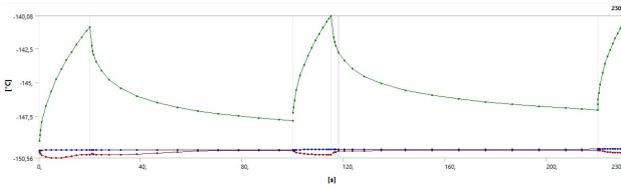


Рис. 4. Номограмма работы бура

Как видно из рис. 4 тепловая нагрузка подводилась трижды в течении 20 сек, 15 сек и 10 сек соответственно, при этом время между подводами тепла составляло 100 сек. Таким образом за период 230 сек установка работала 45 сек. В дальнейшем нужно длительное время чтоб температура стала более равномерной и понизилась в месте контакта. В данной расчетной модели никаких сбросов тепла наружу не предусматривалось, поэтому температура постоянно возрастает, в то же время примерно через 1000 сек. температура в расчетной модели практически перестает изменяться. На рис. 5 приведены картины распределения температур для времени 230 сек и 1230 сек, в это время подвод тепла не производился.

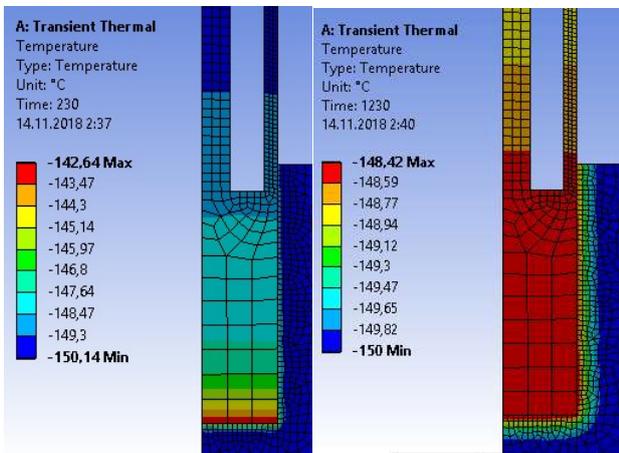


Рис. 5. Картины распределения температур в месте грунтазобора после 230 и 1230 сек соответственно

На рис.6 приведен график изменения температур в период с 0 до 1230 сек.

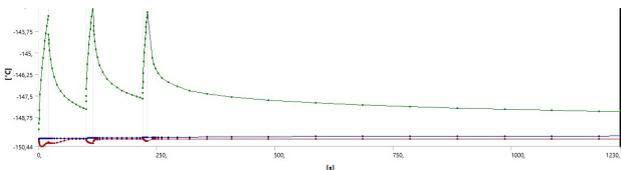


Рис. 6. Изменение максимальной температуры по времени

Как видно из рис. 4 после 480 секунд выравнивание температуры замедлилось, поэтому цикл работы установки можно ограничить 480 сек и повторять циклограмму запуска буровой установки каждые 480 сек, как это показано на рис. 4.

### Выводы

В работе представлено определение тепловой мощности, выделяемой при бурении алмазного бура реголита, с целью последующего использования данного параметра при расчете теплового состояния ГЗУ.

Так же в работе представлен нестационарный тепловой расчет ГЗУ алмазного бурения, с целью оптимального режима работы буровой установки при соблюдении максимального градиента в месте бурения не более 10 градусов кельвина.

В результате проведенных расчетов установлен оптимальный цикл работы ГЗУ устройства алмазного бурения, а именно три включения на 20, 15 и 10 сек. с интервалом 100 сек, после чего период выравнивания температуры в течении 235 сек. И новое повторение цикла.

### Список источников

1. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги модель 1974 года: монография. М.: Академия наук СССР, 1975.
2. Deep J., Alfred W.E. Material Characterization While Drilling on the Moon: Comparing the Atmospheric and Cryogenic Drilling Data. AIAA, 2020.
3. Jaffe L.D. Shear strength of lunar soil from Oceanus Procellarum // The Moon, № 8. pp. 58–72.
4. Deep J. High-Frequency Drilling Data Analysis to Characterize Water-Ice on the Moon / IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition. Texas: 2020.
5. Zaczyn K., Paulsen G. Challenges and methods of drilling on the Moon and Mars / IEEE Aerospace Conference, 2011.
6. О минимизации тепловыделения при бурении скважин по мерзлым породам / Р.М. Скрыбин [и др.] // Вестник СВФУ. 2017. № 4 С. 37–46.

### References

1. Florenskij KP, Bazilevskij AT, Nikolaeva OV. Lunar soil: properties and analogues model. Moscow: Akademia nauk SSSR; 1975. (In Russ.)
2. Deep J, Alfred WE. Material Characterization While Drilling on the Moon: Comparing the Atmospheric and Cryogenic Drilling Data. AIAA; 2020.

3. Jaffe LD. Shear strength of lunar soil from Oceanus Procellarum. *The Moon*. 1973;(8):58–72.
4. Deep J. High-Frequency Drilling Data Analysis to Characterize Water-Ice on the Moon. IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition. Galveston; 2020.
5. Zacny K, Paulsen G. Challenges and methods of drilling on the Moon and Mars. *IEEE Aerospace Conference*; 2011.
6. Scryabin PM, Yakovlev BV, et al. On minimizing heat release during drilling of wells on frozen rocks. *Vestnik SVFU*. 2017;4(8):37-46. (In Russ.)