

УДК 629.787

Анализ возможности измерения внутреннего теплового потока Луны с помощью поверхностных термозондов

К.К. Дудкин

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, 125993, Россия
e-mail: lord-konst@mail.ru

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-5-208-218

Поступила в редакцию 21.05.2020

После доработки 28.05.2020

Принята к публикации 28.05.2020

Приводится описание различных видов контактных датчиков для определения плотности внутреннего теплового потока Луны. Рассматриваются схемы датчиков и принципы их работы. Проведено имитационное моделирование работы некоторых из этих датчиков. Приведены результаты расчетов. Выделены основные типы датчиков, которые могут быть применимы в реальных условиях на космических аппаратах, предполагающих посадку на лунную поверхность.

Ключевые слова: исследование Луны, плотность теплового потока Луны, датчики плотности теплового потока, плотность теплового потока.

Введение

Величину плотности внутреннего теплового потока Луны измеряли различными методами неоднократно, однако в литературных источниках нет единого мнения относительно ее величины.

Этим вопросом занимались В.С. Троицкий, В.Д. Кротиков, Т.В. Тихонова. В работах [1–3] полученные ими оценки плотности теплового потока q_v находятся в пределах от $1.4 \cdot 10^{-2}$ до $5.443 \cdot 10^{-2}$ Вт/м². В работе [4] приводятся данные по величине плотности внутреннего теплового потока от $1.047 \cdot 10^{-2}$ до $1.4 \cdot 10^{-2}$ Вт/м².

Прямые измерения плотности теплового потока в тонком подповерхностном слое Луны были успешно проведены в двух районах: Хэдли Рилли на краю Моря Дождей («Аполлон-15») и Тавр-Литтров в узком заливе на юго-восточной окраине Моря Ясности («Аполлон-17»).

Расчеты плотности теплового потока были проведены на основании измерения теплопроводности и температурного градиента. Тепловой поток в районе Хэдли Рилли соста-

вил $3.1 \cdot 10^{-2}$ Вт/м², в районе Тавр-Литтров – $2.8 \cdot 10^{-2}$ Вт/м² [5]. Это достаточно близко к последним данным В.С. Троицкого [2, 3].

В своей монографии Н.В. Шумаков [6] приводит обобщенные данные по различным оценкам плотности внутреннего теплового потока, полученным при различных измерениях и дает свою оценку некоторого среднего значения.

В нашем исследовании, вслед за Н.В. Шумаковым [6], примем опорное значение плотности потока внутреннего тепла Луны $q_v = 3.14 \cdot 10^{-2}$ Вт/м².

Термозонды для измерения теплового потока можно разделить на две группы: заглубляемые и поверхностные. В работе [7] были рассмотрены заглубляемые термозонды и показана их эффективность по сравнению с поверхностными термозондами. Однако несмотря на это могут возникнуть условия, при которых использование поверхностных термозондов оправдано. Например, если миссия не предусматривает бурения скважины, а космический аппарат не оснащен буром.

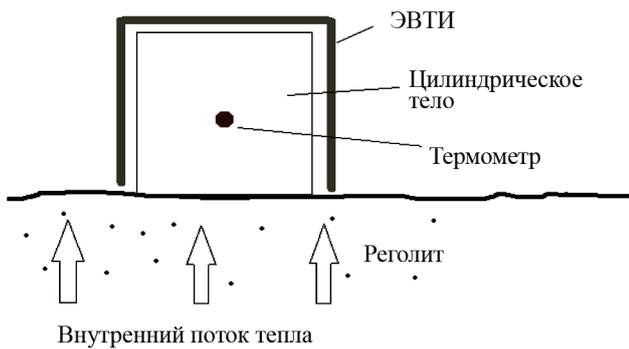


Рис. 1. Схема датчика теплового потока с теплоизолированными боковой и верхней поверхностями (здесь и далее ЭВТИ – экранно-вакуумная теплоизоляция)

В статье будут рассмотрены поверхностные термозонды для измерения плотности внутреннего теплового потока Луны непосредственно на ее поверхности.

1. Простейшие схемы поверхностных термозондов

Поверхностный термозонд располагается на поверхности изучаемой среды и не предполагает заглубления в нее.

Наиболее распространенным типом поверхностного термозонда для измерения плотности теплового потока являются термозонды на основе датчиков тепловых потоков с «одномерными» чувствительными элементами, выполненными из материалов с хорошо известными теплофизическими характеристиками. Датчики конструируются таким образом, чтобы температурное поле в чувствительных элементах можно было бы с приемлемой точностью отождествить с одномерным температурным полем в плоскопараллельной неограниченной пластине. В частности, чувствительный элемент выполняется в виде сплошного цилиндра достаточно малого диаметра с теплоизолированной боковой поверхностью. На один из его торцов действует измеряемый тепловой поток с определенной плотностью, в то время как на другом обеспечиваются условия теплоизолированности (рис. 1), постоянства температуры (рис. 2) или, если трудно обеспечить или проконтролировать указанные граничные условия на верхнем торце, то измерение температуры нужно выполнить как минимум в двух точках (рис. 3) [8].

Поскольку в нашем исследовании опорное значение внутреннего теплового потока Луны принято равным $q_v = 0.0314 \text{ Вт/м}^2$, можно пред-

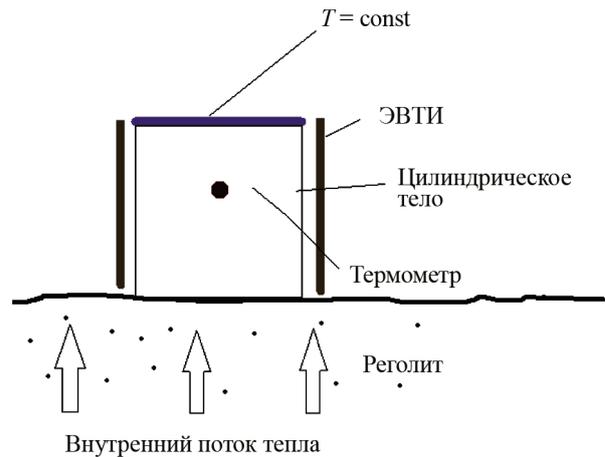


Рис. 2. Схема датчика теплового потока с теплоизолированной боковой и термостатированной верхней поверхностями

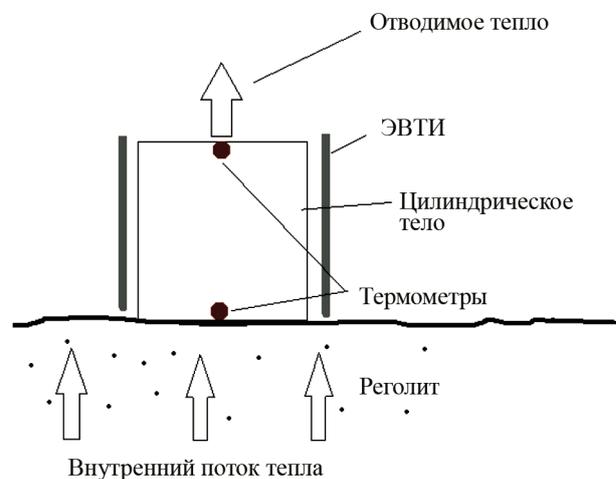


Рис. 3. Схема датчика теплового потока с теплоизолированной боковой поверхностью

положить, что для такой малой величины возникают серьезные трудности при ее точном контактном измерении.

Вариант теплового датчика с постоянной температурой на торце (см. рис. 2) можно отбросить сразу по техническим соображениям. Обеспечить точное постоянство температуры на верхнем торце достаточно сложно, следовательно, данная схема не подходит.

Остальные схемы будут рассмотрены далее.

2. Датчик с термоизолированными поверхностями

Рассмотрим схему, где боковые и верхние стороны датчика теплоизолированы (см. рис. 1). Принцип действия датчика заключается в следующем: измеряя зависимость температуры тела датчика от времени, по полученным данным

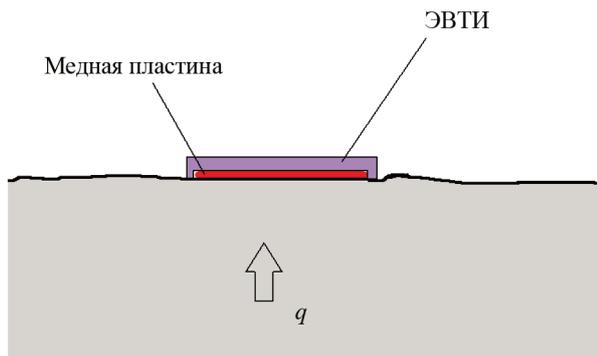


Рис. 4. Схема датчика с термоизолированными поверхностями

можно из решения нестационарной обратной задачи определить величину искомого теплового потока.

Поскольку тело датчика должно обладать высокой теплопроводностью, примем следующую схему. На поверхность грунта помещается тонкий медный диск (рис. 4). Верхняя и боковая поверхности его тщательно изолированы. Температуру по всему диску в каждый момент времени можно считать одинаковой, т.е. при расчетах нестационарной задачи можно пользоваться квазистационарным приближением.

При использовании данной схемы возникает ряд сложностей.

Во-первых, в самом начале эксперимента пластина будет иметь свою собственную температуру. При контакте с грунтом это исказит и без того достаточно тонкие распределения температуры.

Во-вторых, даже если взять идеальный случай и представить, что изначально температура пластины и грунта была одинаковой, то сразу же после помещения пластины на грунт соответствующий участок грунта окажется изолирован от внешнего пространства, и отдача тепла

через этот участок во внешнее пространство прекратится. В результате, локальная область под пластиной начнет нагреваться, создавая сопротивление тепловому потоку. Это значит, что тепловой поток, приходящий на пластину, начнет постепенно ослабевать. Таким образом, тепловой поток, поступающий на пластину, уже не будет соответствовать номинальному внутреннему тепловому потоку Луны и к тому же будет изменяться во времени. В конечном итоге, температура пластины поднимется до определенного значения так же, как и температура локального участка грунта под пластиной, и тепло прекратит поступать в данную зону (рис. 5). Температура пластины будет несколько больше температуры окружающего грунта, и система придет к равновесию.

Описанные изменения температур в условиях сверхмалого теплового потока и неизвестных теплофизических характеристик грунта крайне сложно поддаются анализу. Скорее всего, в естественных условиях эти изменения будут сравнимы с погрешностями и не позволят определить внутренний тепловой поток с приемлемой точностью.

Чтобы получить в реальных условиях какой-либо приемлемый для измерения теплового потока градиент температур, очевидно, придется использовать стационарный режим.

3. Датчик с термоизолированной боковой поверхностью

Рассмотрим еще один вариант датчика – с теплоизолированной боковой поверхностью и отводом тепла на торце (см. рис. 3).

Принцип действия датчика следующий. На поверхность грунта помещается некоторое тело (наиболее удобно цилиндрическое тело), боковая поверхность которого теплоизолирована. С верхней поверхности отводится тепло. В данном случае тепло отводится излучением с поверхности с фиксированной степенью черноты. Через некоторое время после помещения датчика на поверхность грунта вся система приходит в равновесие. Предполагается, что значи-

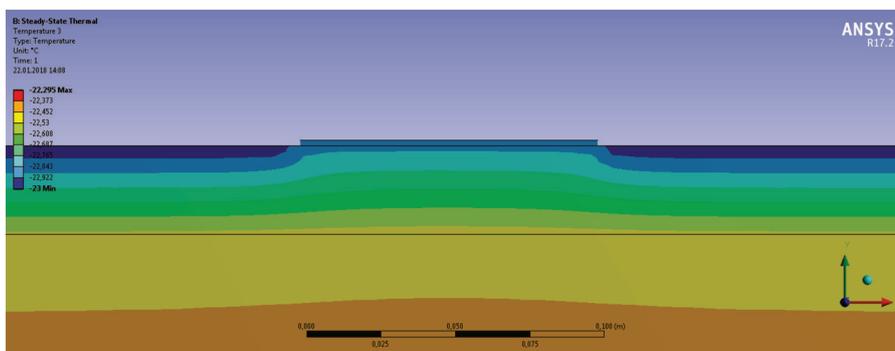


Рис. 5. Распределение температур при моделировании действия датчика с термоизолированными поверхностями

тельная часть тепловой энергии будет проходить через цилиндрическое тело датчика, создавая некую разность температур между нижней и верхней его частью. Анализируя этот градиент температур, можно оценить искомый тепловой поток. При этом цилиндрическое тело датчика не должно иметь слишком высокую теплопроводность, чтобы создавалась необходимая для анализа разность температур.

Проведем имитационное моделирование работы такого термозонда. Исходные данные и постановка тепловой задачи следующие.

Геометрические параметры датчика: цилиндр диаметром 100 мм и высотой 100 мм. Материал – нержавеющая сталь, теплопроводность $\lambda_d = 15.1 \text{ Вт/(м·К)}$. Плотность внутреннего теплового потока, как уже отмечалось, $q_d = 0.0314 \text{ Вт/м}^2$, теплопроводность верхнего слоя грунта $\lambda_{гр} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}$, степень черноты верхней поверхности датчика условно примем $\epsilon_d = 1$, степень черноты окружающего грунта $\epsilon_{гр} = 0.72$.

Постановка задачи следующая. Пусть задана некоторая область $G(x', y', z')$ трехмерного евклидова пространства $E_3(x, y, z)$. При этом $0 < x' < x_1$; $0 < y' < y_1$; $0 < z' < z_1$ (рис. 6).

Область пространства G ограничивает тело, имитирующее грунт. При этом, несмотря на то, что этот участок грунта конечен, его размеры настолько велики, что позволяют имитировать полубесконечное тело, верхняя поверхность которого описывается поверхностью $P(x, y_1, z)$.

На поверхности P находится еще одно цилиндрическое тело, ограниченное областью пространства M , где $M \subset E_3$. Это тело имитирует датчик.

На рис. 7 схематически изображены тела в разрезе, описываемые областями M и G , и обозначены зоны, используемые в математической записи постановки задачи.

Вся система состоит из двух тел: грунт и датчик.

Уравнения теплопроводности

Уравнение теплопроводности для грунта:

$$\frac{\partial^2 T(G_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(G_1)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(G_1)}{\partial z^2} = 0;$$

$$(G_1 \in G).$$

Здесь G – область пространства, занятая грунтом.

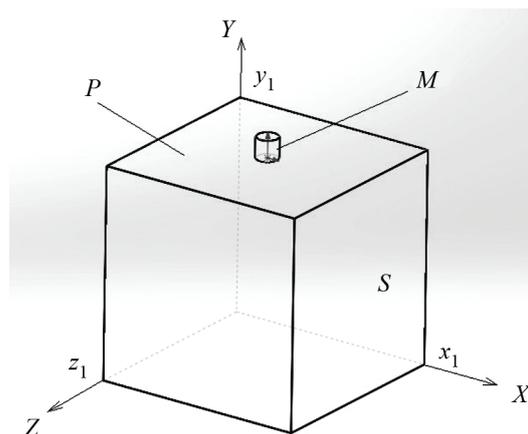


Рис. 6. Области пространства, используемые в постановке задачи

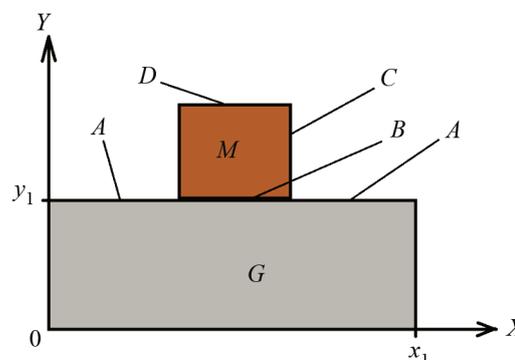


Рис. 7. Тела, используемые в постановке задачи

Уравнение теплопроводности для датчика:

$$\frac{\partial^2 T(M_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(M_1)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(M_1)}{\partial z^2} = 0;$$

$$(M_1 \in M).$$

Здесь M – область пространства, занятая датчиком.

Граничные и начальные условия

Условие равенства тепловых потоков и температур на контакте датчика и грунта:

$$\lambda_d \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{B_d} = \lambda_{гр} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{B_{гр}};$$

$$T|_{B_d} = T|_{B_{гр}},$$

где B_d – поверхность датчика, контактирующая с грунтом; $B_{гр}$ – поверхность грунта, контактирующая с датчиком, причем $B_{гр} \subset P$; λ_d – теплопроводность датчика; $\lambda_{гр}$ – теплопроводность грунта (рис. 7).

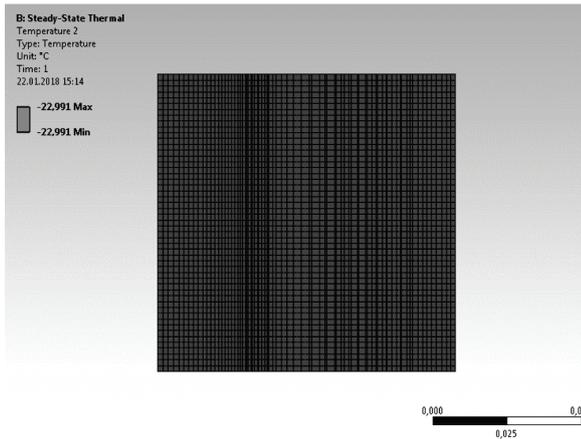


Рис. 8. Распределение температуры внутри чувствительного элемента при моделировании работы датчика с термоизолированной боковой поверхностью

Условие теплоизолированности боковой поверхности датчика:

$$\lambda_d \frac{\partial T}{\partial i_C} \Big|_C = 0,$$

где C – боковая поверхность датчика; i_C – нормаль к поверхности C .

Условие теплового потока на нижней поверхности области G :

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(x, 0, z)}{\partial y} + q_{л} = 0,$$

где $q_{л}$ – плотность теплового потока Луны.

Условие излучения с верхней поверхности грунта:

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_A + \varepsilon_{гр} \sigma T^4 \Big|_A = 0,$$

где A – верхняя поверхность грунта, причем $A \subset P$, однако $B_{гр} \not\subset A$; $\varepsilon_{гр}$ – степень черноты поверхности A ;

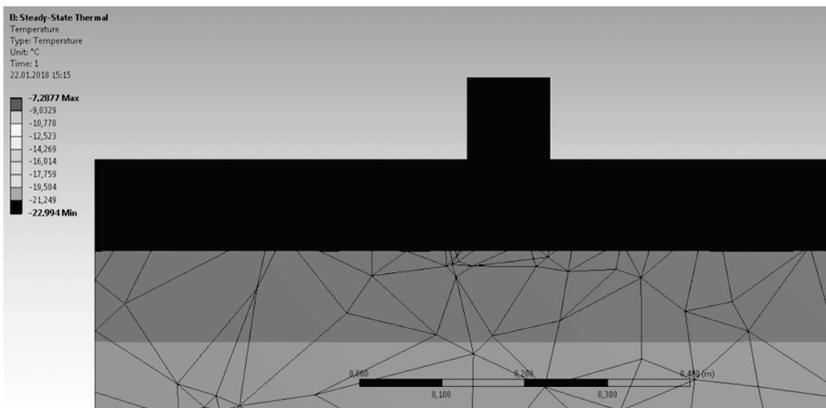


Рис. 9. Распределение температуры при моделировании работы датчика с термоизолированной боковой поверхностью

$\sigma = 5.670367(13) \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right)$ – постоянная Стефана–Больцмана.

Условие излучения с верхней поверхности датчика:

$$\lambda_d \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_D + \varepsilon_d \sigma T^4 \Big|_D = 0,$$

где D – верхняя поверхность датчика; ε_d – степень черноты поверхности D .

Условие нулевого потока на боковой поверхности тела G :

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(0, y, z)}{\partial x} = 0; \quad \lambda_{гр} \frac{\partial T(x, y, 0)}{\partial z} = 0;$$

$$\lambda_{гр} \frac{\partial T(x_1, y, z)}{\partial x} = 0; \quad \lambda_{гр} \frac{\partial T(x, y, z_1)}{\partial z} = 0.$$

На рис. 8 представлена картина распределения температуры внутри датчика. На рис. 9 показано распределение температуры во всей модели.

Как видно из рис. 8 и 9, при моделировании не наблюдается заметной разницы температур на верхней и нижней поверхности датчика. Это означает, что была взята слишком высокая теплопроводность. Следовательно, теплопроводность тела датчика надо понизить. Попытка решения этой проблемы реализована в Н-образном термозонде.

4. Н-образный поверхностный термозонд для измерения плотности теплового потока. Конструкция и принцип действия

Предположим, что у нас имеется тепловой датчик, построенный по схеме, показанной на рис. 3, с чувствительным элементом из того или иного материала с известными теплофизическими свойствами. Пусть этот элемент имеет цилиндрическую форму, и его нижний торец контактирует с грунтом. Верхний торец не имеет теплоизоляции и излучает тепловой поток в космос (тепловое влияние Солнца не учитываем, в частности, можно представить, что измерение проводится ночью). Тогда после установления

стационарного режима, скорее всего, будет происходить процесс «затекания» теплового потока с ближайших зон грунта из-за более высоких значений теплопроводности и излучательной способности поверхности чувствительного элемента датчика по отношению к лунному грунту. Вариант с «обтеканием» датчика также возможен, когда из-за слишком сильного теплового сопротивления и слабой излучательной способности верхней поверхности датчика тепловой поток будет обходить эту зону. В любом случае плотность теплового потока, который будет проходить через чувствительный элемент датчика и который будет измеряться, окажется не соответствующей искомой величине.

Единственный способ приблизить плотность теплового потока, проходящего через чувствительный элемент этого датчика, к естественной – попытаться приблизить его характеристики к характеристикам самого грунта. В первую очередь это касается теплового сопротивления тела датчика и степени черноты верхнего торца.

К тому же большее тепловое сопротивление даст и большую разность температур, что положительно скажется на возможности измерения плотности теплового потока.

Похожий подход с приравниванием тепловых сопротивлений термозонда и грунта описан в [9], однако там он используется для определения теплофизических характеристик грунта, в первую очередь – теплопроводности.

Тепловое сопротивление однородного чувствительного элемента с постоянной площадью сечения равно:

$$R = \frac{l}{\lambda S}, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения цилиндра; l – высота; λ – теплопроводность.

Итак, сопротивление чувствительного элемента термозонда должно быть равно сопротивлению воображаемого цилиндра грунта:

$$R_1 = R_2 \quad (2)$$

или

$$\frac{l_1}{\lambda_1 S_1} = \frac{l_2}{\lambda_2 S_2}, \quad (3)$$

где индекс «1» относится к грунту, а «2» – к термозонду.

Если посмотреть на формулу (3) и сопоставить ее с принятой ранее теплопроводностью

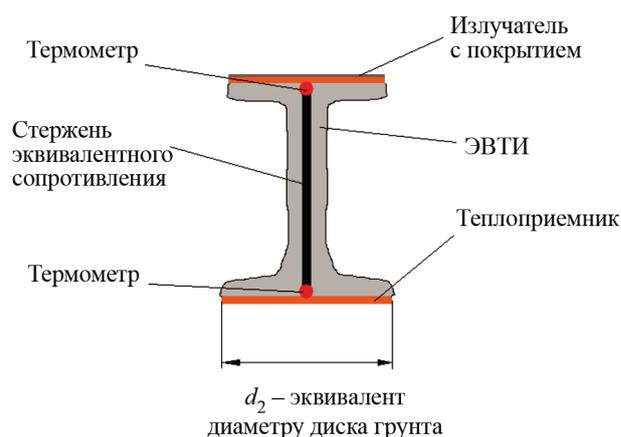


Рис. 10. Принципиальная схема Н-образного термозонда

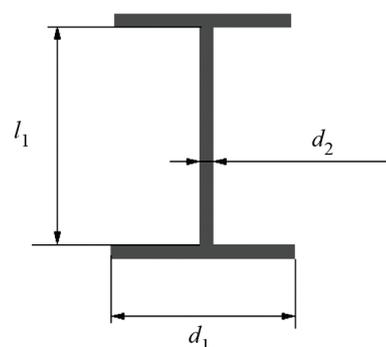


Рис. 11. Размеры основных элементов термозонда

грунта $\lambda = 2 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К), то можно увидеть, что эквивалентом теплового сопротивления диска лунного грунта будет тонкая длинная проволока из материала со значительно большей теплопроводностью. При этом диаметр диска термозонда будет значительно больше диаметра проволоки (рис. 10).

Проведем моделирование задачи теплообмена. Примем в качестве исходных данных теплопроводность грунта $\lambda_{гр} = 2 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К) и диаметр эквивалентного цилиндра грунта $d_{гр} = 0.1$ м.

В качестве материала стержня эквивалентного сопротивления возьмем сплав 40X10C2M, его теплопроводность $\lambda_{ст} = 17$ Вт/(м·К).

Геометрические характеристики стержня примем следующими (рис. 11): $d_2 = 0.001$ м = 1 мм, $l_2 = 0.1$ м.

Тогда по формуле (3) получаем $l_{гр} = 0.01176$ м. Это высота эквивалентного цилиндра лунного грунта.

Начальные условия следующие:

– начальная температура системы $T_0 = -23^\circ\text{C}$;

- диаметр верхнего и нижнего медных дисков $d_1 = 100$ мм;
- теплопроводность медных дисков $\lambda_{д} = 400$ Вт/(м·К);
- степень черноты верхнего диска термозонда $\varepsilon_m = 0.72$;
- стержень из 40X10C2M $d_2 = 1$ мм, $l = 100$ мм, теплопроводность стержня $\lambda_{ст} = 17$ Вт/(м·К);
- теплопроводность лунного грунта $\lambda_{гр} = 0.002$ Вт/(м·К), степень черноты поверхности $\varepsilon_{гр} = 0.72$; плотность внутреннего теплового потока Луны $q_{л} = 0.0314$ Вт/м². Тепловой контакт между медными дисками и стержнем – идеальный.

Постановка задачи аналогична приведенной в предыдущем пункте для датчика с термоизолированными боковыми поверхностями.

Однако расчеты показали, что такой подход к измерению теплового потока Луны дает неудовлетворяющие с точки зрения точности результаты и не может быть использован для

непосредственных измерений. Результаты моделирования теплового потока для рассматриваемой схемы представлены на рис. 12 и 13, где показано распределение температуры для установившегося теплового потока (стационарный случай).

Несмотря на то, что, как видно на рис. 12, создается некий температурный напор, и часть тепла все же проникает в термозонд, из приведенных на рис. 13 результатов, можно видеть, что перепад температур в крайних точках термозонда чрезвычайно мал.

Рассчитанная по данному перепаду плотность теплового потока имеет величину $q_{расч} = 0.00026$ Вт/м², которая весьма далека от искомого значения.

5. Поверхностные батарейные датчики с термопарами

Чтобы понять принцип работы данного вида датчика, представим в общих чертах схему одиночного датчика, а затем перейдем к описанию батарейного датчика.

Одиночный датчик представляет собой своеобразную «сплюснутую» дифференциальную термопару (рис. 14). При расположении датчика на изотермической поверхности исследуемого тела на гранях промежуточного слоя толщиной δ возникает разность температур, пропорциональная измеряемой плотности потока. Эта разность температур вызывает соответствующую термоэдс, которая токосъемными проводами подается на измерительный прибор.

Существенный недостаток одиночных датчиков заключается в их низкой чувствительности. В уникальных приборах, требующих либо тщательной изоляции от внешних влияний либо глубокого охлаждения, достигнута чувствительность ~ 200 Вт/м², что абсолютно неприемлемо для уровня измеряемых тепловых потоков в лунных условиях.

Все это приводит к необходимости увеличения чувствительности на 4–5 порядков. Наиболее простое решение задачи состоит в соединении одиночных элементов в последовательные батареи, образуя тем самым батарейные датчики теплового потока (БДТП).

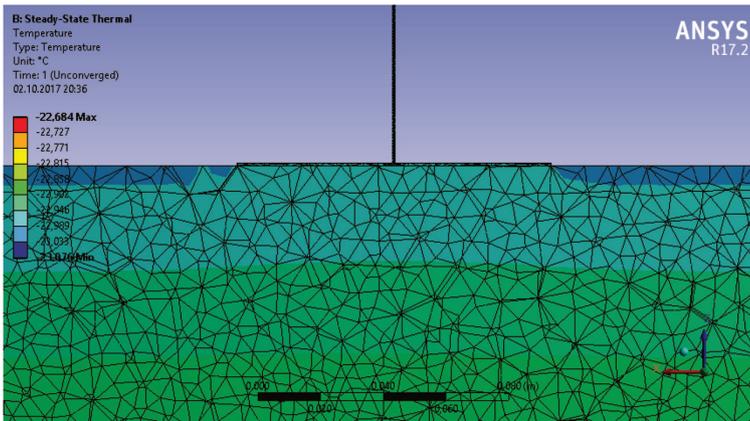


Рис. 12. Температурное распределение в нижней части H-образного термозонда

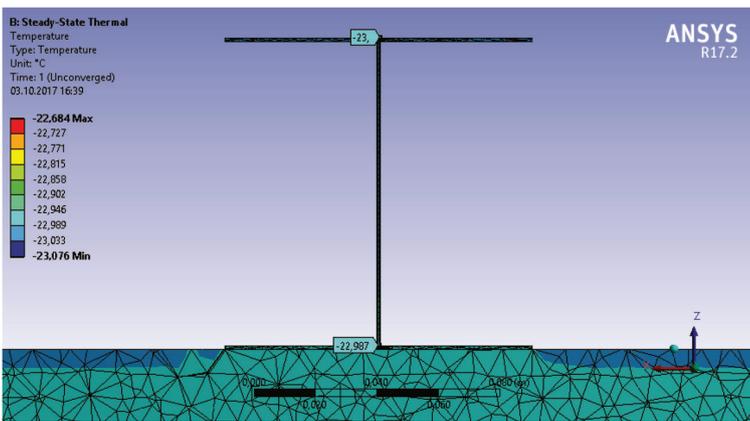


Рис. 13. Температурное распределение H-образного термозонда

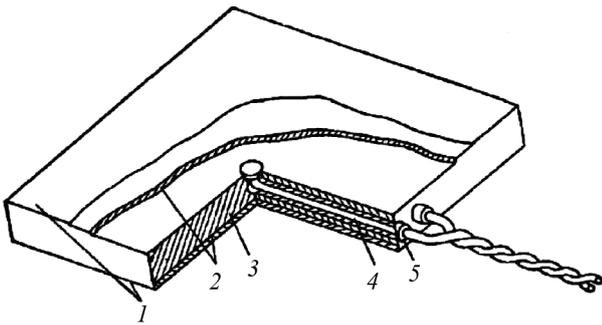


Рис. 14. Одиночный датчик теплового потока: 1 – никелевое покрытие; 2 – медные термоэлементы; 3 – промежуточный термоэлемент; 4 – токосъемные провода; 5 – изоляционные втулки

Основная идея устройства теплотрической батареи состоит в том, что элементы включены параллельно по измеряемому потоку и последовательно по генерируемому сигналу (рис. 15).

При дальнейшем увеличении чувствительности за счет числа элементов необходимо уменьшать их поперечные сечения. Теоретически на каждом квадратном сантиметре может уложиться более 10^4 проводников диаметром 0.1 мм, что соответствует 5000 парных элементов. Практически число элементов в особенно тщательном исполнении удавалось довести до 2000 шт./см². Однако изготовление таких датчиков – процесс крайне трудоемкий.

Применение гальванических термопар значительно упрощает технологию изготовления батарейных датчиков при несущественном снижении чувствительности.

Чувствительные элементы датчиков имеют вид винтовых пружин с наружным диаметром около 1 мм, навитых из константановой проволоки диаметром 0.1 мм. Половина каждого витка покрывалась слоем меди и изоляционным лаком. В датчике пружинка укладывалась по спирали таким образом, чтобы места переходов полувитков, покрытых медью и без медного покрытия, находились в верхней и нижней плоскостях датчика. В связи с характером укладки элементов датчики получили название спиральных (рис. 16).

Недостатки спиральных датчиков заключаются в низкой плотности заполнения пространства, занятого чувствительными элементами, в связи с чем термическое сопротивление датчиков сравнительно велико, а также в том, что при меднении эластичных пружин и последующей их укладке в батарею возникают большие технологические трудности.

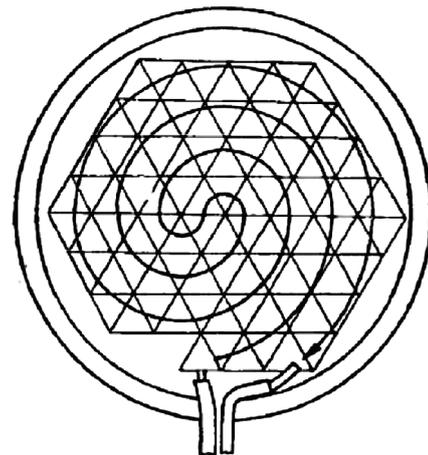


Рис. 15. Схема соединения треугольных элементов в круглом БДТП

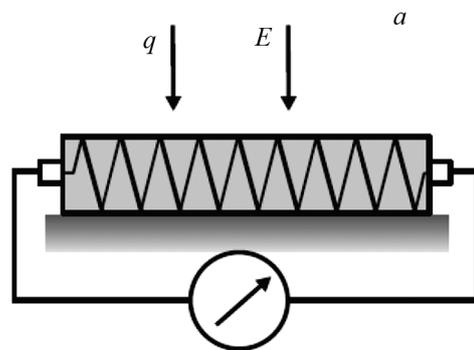


Рис. 16. Схема датчика спирального типа

Устранение названных недостатков при сохранении преимуществ получено в градиентных датчиках теплового потока [10].

6. Поверхностные батарейные датчики на основе анизотропных монокристаллов висмута или градиентные датчики теплового потока

Действие градиентных датчиков теплового потока основано на так называемом поперечном эффекте Зеебека – эффекте появления термоэдс с вектором напряженности, нормальным к вектору теплового потока, в средах с анизотропией теплопроводности, электропроводности и коэффициента термоэдс. Основы теории градиентных датчиков теплового потока обобщены в работах [11–13].

На рис. 17 приведен прямоугольный параллелепипед, вырезанный из монокристалла висмута, – это анизотропный термоэлемент, а показанная на рисунке плоскость называется тригональной плоскостью.

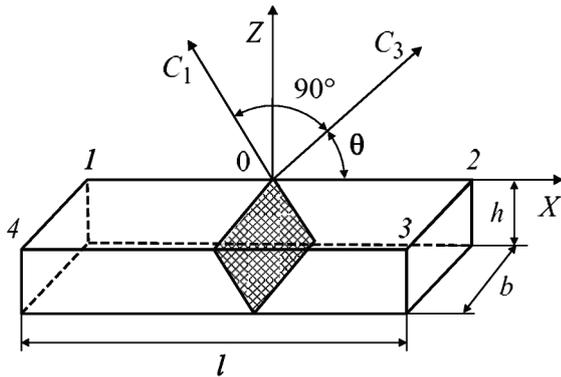


Рис. 17. Анизотропный термоэлемент размером $l \times b \times h$. C_1, C_3 – главные кристаллографические оси; θ – угол, под которым термоэлемент вырезан из монокристалла

Таким образом, термоэдс e_x линейно связана с плотностью теплового потока q_z и площадью элемента F , а ее величину определяет выбор угла θ (для висмута оптимальное значение $\theta_{opt} = 53.4^\circ$).

Основной характеристикой такого термоэлемента является вольт-ваттная чувствительность (V/W):

$$S_0 = \frac{e_x}{q_z F}. \quad (4)$$

Одиночная пластинка висмута имеет толщину 0.1–0.2 мм, ее площадь в плане F и сигнал e_x оказываются весьма малыми. Именно поэтому термоэлементы (как и термопары в датчиках продольного типа) соединяют последовательно. Полученные в результате батареи и составляют конструкцию градиентного датчика теплового потока.

На рис. 18 схематически показан такой датчик, изготовленный из пластинок висмута. Пространственное расположение тригональных плоскостей в двух соседних элементах обеспечивает суммирование действующих в них конечных термоэдс.

Датчик монтируют на подложках 5 из слюды. Пластины 1 изолируют одну от другой тонкими прокладками из лавсана 2 и склеивают с подложкой из слюды 5 клеем БФ-2. Спаи 3 выполнены чистым висмутом и соединяют пластины 1 в последовательный контур. Крайние пластины снабжают токовыводами 4.

Термоэдс градиентного датчика теплового потока такой конструкции равна

$$E = q_z n S_0, \quad (5)$$

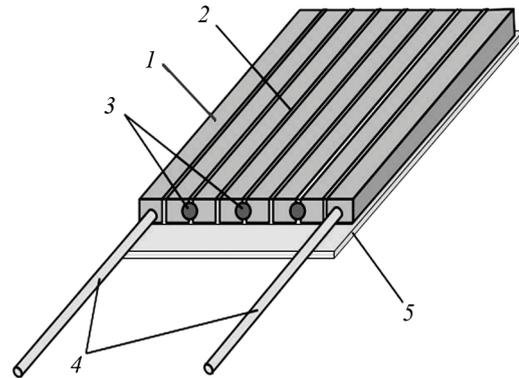


Рис. 18. Конструкция градиентного датчика теплового потока: 1 – пластинка из анизотропного висмута; 2 – прокладки; 3 – спаи; 4 – токовыводы; 5 – подложка

где n – число элементов (пластинок 1), составляющих датчик.

Толщина такого датчика, доведенная до 0.1–0.2 мм, при эффективной теплопроводности, близкой к 7.45 Вт/(м·К), обеспечивает термическое сопротивление $10^{-5} \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

В опытах с градиентными датчиками теплового потока, о которых говорится в [14], брались датчики на основе монокристаллов висмута чистоты 0.9999; для них $S_0 = 5\text{--}20 \text{ мВ/Вт}$, а рабочий диапазон температур составляет 20–540 К (верхняя граница близка к точке плавления висмута). Разработанная методика [11] позволяет градуировать градиентные датчики по тепловому потоку с погрешностью не более 1%. Тепловые шумы датчиков из висмута сопоставимы с шумами в других чистых металлах. Сопротивление типичных батарейных градиентных датчиков теплового потока позволяет регистрировать сигнал любой аппаратурой, используемой в комплекте с традиционными термопреобразователями [14].

Проведем примерный расчет величины сигнала, который можно получить при использовании градиентных датчиков теплового потока. Примем следующие данные:

– площадь датчика $0.1 \times 0.1 \text{ м} = 0.01 \text{ м}^2$;

– величина теплового потока Луны $q_l = 0.0314 \text{ Вт/м}^2$;

– вольт-ваттная чувствительность датчика $S_0 = 20 \text{ мВ/Вт} = 0.002 \text{ В/Вт}$.

Из формулы (4) выражаем ЭДС:

$$e_x = S_0 q_z F = 6.28 \cdot 10^{-7} \text{ В} = 0.628 \text{ мкВ}.$$

В настоящее время существуют серийные нановольтметры, способные измерять величины напряжения до 10^{-9} В . Поэтому сигнал гра-

диентного датчика теплового потока вполне может быть зарегистрирован с достаточной точностью.

Заключение

В данной статье было рассмотрено шесть схем датчиков для измерения плотности внутреннего теплового потока Луны: датчик с термоизолированными поверхностями, датчик с термоизолированной боковой и термостатированной верхней поверхностью, датчик с термоизолированной боковой поверхностью, Н-образный датчик, батарейный датчик теплового потока, градиентный датчик теплового потока.

По результатам анализа можно сразу исключить для практического использования датчик с термоизолированными поверхностями, датчик с термоизолированной боковой и термостатированной верхней поверхностью и датчик с термоизолированной боковой поверхностью, поскольку при эксплуатации в лунных условиях они не дают достоверных результатов измерений или их использование сопряжено с техническими трудностями.

Н-образный термозонд не дает правильные результаты при характерных для Луны величинах теплового потока и также не может быть использован при столь тонких измерениях. Однако при измерениях, требующих меньшей точности, он, возможно, будет давать приемлемые результаты. Батарейный датчик с термопарами не имеет широкого применения в наше время, обладает большими технологическими сложностями при изготовлении, вносит значительное термическое сопротивление и проигрывает по точности аналогичному, но более современному градиентному датчику теплового потока.

Что касается точности градиентных датчиков теплового потока, в литературных источниках есть данные только по градуировке подобных датчиков. Разработанная методика [11] позволяет градуировать градиентные датчики теплового потока по тепловому потоку с погрешностью не более 1%. Однако эти данные нельзя считать погрешностью датчика при измерениях, так как, во-первых – это погрешность градуировки, а во-вторых – они были получены при температурных режимах в лабораторных

условиях, отличных от естественных условий на поверхности Луны. Необходимы дальнейшие исследования по данному вопросу и проведение экспериментов с максимальным приближением к лунным условиям.

Несмотря на вышесказанное, градиентный датчик теплового потока можно рекомендовать для дальнейшего анализа его точности с целью использования на исследовательских космических аппаратах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Радиоизлучение и природа Луны // Успехи физических наук. 1963. Т. 81. Вып. 4. С. 589–639.
2. Троицкий В.С. Результаты исследования Луны по ее собственному излучению // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1266–1282.
3. Троицкий В.С., Тихонова Т.В. Тепловое излучение Луны и физические свойства ее верхнего покрова // Изв. вузов. Радиофизика. 1970. Т. 13. № 9. С. 1273–1311.
4. Иванов Н.С. Методы измерения тепловых потоков в горных породах. В кн.: Тепло- и массообмен в мерзлых почвах и горных породах. М.: АН СССР, 1961. С. 91–104.
5. Лангсет М.С., Кейм С.Д. Непосредственные измерения теплового потока на Луне. В кн.: Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 200–209.
6. Шумаков Н.В. Метод последовательных интервалов в теплотрии нестационарных процессов. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
7. Дудкин К.К., Алифанов О.М. Измерения плотности внутреннего теплового потока Луны проникающими термозондами // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 6. С. 283–288.
8. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
9. Маров М.Я., Колесниченко А.В., Мануйлов К.К., Осипов В.П. Эксперимент «Термофоб»: Прямые исследования теплофизических свойств грунта Фобоса // Астроном. Вест. 2010. Т. 44. № 5. С. 422–430.
10. Геращенко О.А. Основы теплотрии. Киев: Наукова думка, 1971. 192 с.
11. Дивин Н.П. Датчик теплового потока. АС. № 9959 с приоритетом 10 августа 1998 г. БИ. 1999. № 5.
12. Divin N., Kirillov A., Sapozhnikov S. Messtechnik zur Untersuchung von Vorgängen in thermischen Energieanlagen // XXVIII. Kraftwerkstechnisches Kolloquium und 6. Kolloquium Messtechnik für Energieanlagen. Dresden, 1996. P. 26–28.
13. Divin N., Sapozhnikov S. Gradient heat-flux transducers: application for heat investigations // Proc. Intern Symposium in Power Machinery. Moscow, 1995. P. 79–81.
14. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.Ю. Измерение нестационарных тепловых потоков градиентными датчиками на основе анизотропных монокристаллов висмута // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. Вып. 7. С. 114–120.

Analyzing the possibility of the Moon internal thermal flow measuring with surface thermal probes

K.K. Dudkin

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia
e-mail: lord-konst@mail.ru

The article considers various sensors for density measuring of the Moon internal heat flux and performs their analysis. The following sensor schemes are presented: a sensor with thermally insulated side and upper surfaces; a sensor with thermally insulated side and a thermostatically controlled upper surface; a sensor with thermally insulated side surface, and a gradient heat flow sensor. According to the analysis results, a thermal probe with thermally insulated surfaces demonstrated low efficiency when used in lunar conditions, due to the unsteady heat transfer model application, which can result in poor accuracy of the results. The sensor with thermally insulated side and thermostatically controlled top surfaces has low prospects of application for technical reasons. It is rather difficult to ensure constant temperature at the upper surface with high accuracy. For the sensor with thermally insulated side surfaces, simulation of its operation was performed. It was revealed by the simulation results that no significant temperature difference formed, and this sensor would not have the prospects for implementation. The Moon internal heat flux density is of utterly low values, which stipulates the measurements complexity. According to the manufacturer's data, the gradient heat flow sensor has high sensitivity and can measure extremely low heat flux values. By the results of the analysis an inference can be drawn that this sensor can be implemented for contact measuring of the Moon internal heat flux.

Keywords: Moon exploration, Moon heat flux density, heat flux density sensors, heat flux density.

REFERENCES

1. **Krotikov V.D., Troitsky V.S.** Radioizluchenie i priroda Luny [Radio emission and the nature of the Moon]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Physics-Uspekhi*, 1963. vol. 81, no. 4, pp. 589–639. In Russ.
2. **Troitskii V.S.** Results of an investigation of the Moon from its radiation characteristics. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1971, vol. 10, no. 9-10, pp. 709–718. DOI: 10.1007/BF01031600
3. **Troitskii V.S., Tikhonova T.V.** Thermal radiation from the Moon and the physical properties of the upper lunar layer – a review. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1973, vol. 13, no. 9, pp. 981–1010. DOI: 10.1007/BF01032762
4. **Ivanov N.S.** *Metody izmereniya teplovykh potokov v gornykh porodakh*. V kn.: *Teplo i massoobmen v merzlykh pochvakh i gornykh porodakh* [Methods for measuring heat flux in rocks. In: Heat and Mass Transfer in Frozen Soils and Rocks]. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1961, pp. 91–104. In Russ.
5. **Langseth M.G., Keihm S.J.** In situ measurements of lunar heat flow. In: *J.H. Pomeroy and N.J. Hubbard (eds.). The Soviet-American Conference on Cosmochemistry of the Moon and Planets, June 4-8, 1974*, Moscow. NASA Special Publication 370, Part I, pp. 283–293.
6. **Shumakov N.V.** *Metod posledovatel'nykh intervalov v teplometrii nestatsionarnykh protsessov* [The method of successive intervals in the thermometry of non-stationary processes]. Moscow: Atomizdat, 1979. 246 p. In Russ.
7. **Dudkin K.K., Alifanov O.M.** Izmereniya plotnosti vnutrennego teplovogo potoka Luny pronikayushhimi termozondami [Density measurements of lunar internal heat by penetrating thermal probe]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2019, vol. 11, no. 6, pp. 283–288. In Russ.
8. **Alifanov O.M.** *Obratnye zadachi teploobmena* [Inverse heat transfer problems]. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 280 p. In Russ.
9. **Marov M.Y., Kolesnichenko A.V., Manuilov K.K., Osipov V.P.** The Thermophob experiment: direct investigations of the thermophysical properties of the regolith of Phobos. *Solar System Research*, 2010, vol. 44, no. 5, pp. 393–402. DOI: 10.1134/S0038094610050060
10. **Gerashchenko O.A.** *Osnovy teplometrii* [The basics of heat metering]. Kiev: Naukova dumka, 1971. 192 p. In Russ.
11. **Divin N.P.** *Datchik teplovogo potoka* [Heat flow sensor]. Patent RU, no. 9959, 1998.
12. **Divin N., Kirillov A., Sapozhnikov S.** Messtechnikzur Untersuchung von Vorgangen in thermischen Energieanlagen. *Proc. Of XXVIII Kraftwerkstechnisches Kolloquium und 6. Kolloquium Messtechnik fur Energieanlagen*. Dresden, 1996, pp. 26–28.
13. **Divin N., Sapozhnikov S.** Gradient heat-flux transducers: application for heat investigations. *Proceedings of International Symposium in Power Machinery*, Moscow, 1995. pp. 79–81.
14. **Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Y., Mitiakov A.V.** Measurements of nonstationary heat fluxes by gradient sensors based on single-crystalline anisotropic bismuth. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 49, no. 7, pp. 920–926. DOI: 10.1134/1.1778869