

УДК 536.331

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ФРАГМЕНТОВ ПРИРОДНЫХ СРЕД С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ

В.В. ЛОБУНОВ, Т.В. БОРБОТЬКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 1 сентября 2017

Аннотация. В работе представлены результаты исследования температуры поверхности фрагментов природных сред, таких как грунт и песок, при облучении их источником с интенсивностью, близкой к интенсивности солнечного излучения. Получены данные по зависимости температуры поверхности образцов сред от массового отношения влаги в их объеме при различных углах визирования, что позволило предложить использование метода электротепловой аналогии для определения функции аппроксимации этих закономерностей с целью их аналитического описания и дальнейшего прогнозирования температурных изменений. Полученные данные необходимы для создания имитаторов с контролируемой температурой поверхности, используемых в целях противодействия средствам тепловизионной разведки.

Ключевые слова: температура поверхности, природные среды, тепловизор, электротепловая аналогия, маскировка.

Abstract. The paper presents the results of studying the surface temperature of natural environments fragments, such as soil and sand, when irradiated with a source with intensity close to the intensity of solar radiation. Data of temperature dependence of the environment samples surface on the mass ratio of humidity in their volume at different viewing angles were obtained. According to the obtained regularities, the use of the electrothermal analogy method to determine the approximation function of these regularities with the aim to their analytical description and further prediction of temperature changes is proposed. The obtained data are necessary for the creation of imitators with a controlled surface temperature, used to counter the means of infrared intelligence.

Keywords: surface temperature, natural environments, thermal camera, electrothermal analogy, cloaking.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 108, No. 6, pp. 76-81

Temperature surface evaluation of natural environments fragments with application of electrothermal analogy method

V.V. Lobunov, T.V. Borbot'ko

Введение

Обнаружение и идентификация наземных объектов по тепловому каналу осуществляется с использованием тепловизионных средств обнаружения [1, 2]. Указанные задачи решаются в условиях ограниченной метеорологической дальности видимости, что обуславливает первостепенное использование таких средств для ведения технической разведки. Дальность обнаружения ограничена разрешающей способностью тепловизионной камеры, ее чувствительностью и оптической системой и при этом может достигать десятков километров [3, 4]. Таким образом, возникает необходимость в разработке мер по противодействию тепловизионным средствам обнаружения.

В общем случае такая задача сводится к минимизации температурного различия объекта наблюдения и среды (фона), на котором он располагается. Для этого применяются маскировочные средства, которые позволяют минимизировать излучение скрываемого объекта [5]. При создании таких средств используются многослойные композиционные

материалы, теплофизические свойства которых слабо изменяются со временем. Эксплуатация средств теплового скрываются обычно проводится в ночное время суток, когда оптическая видимость объекта ограничена. Если же маскировка осуществляется в дневное время суток, то маскировочные средства нагреваются солнечным излучением. Динамика нагрева поверхности материала средства может не соответствовать динамике нагрева фона из-за различия в их теплопроводности и коэффициенте излучения. При продолжительном нагреве температура материала может в несколько раз превышать температуру природной среды. Также температурные различия могут наблюдаться из-за разного коэффициента излучения поверхностей. Все это в совокупности приводит к повышению температурного контраста и снижению эффективности средств маскировки.

Целью исследований являлось определение характеристик изменения температуры поверхностей различных естественных сред при их облучении солнечным излучением в течение определенного интервала наблюдения. В рамках исследования была поставлена задача по аналитическому описанию полученных зависимостей. Данная информация в дальнейшем необходима для создания имитаторов с контролируемой температурой поверхности, изменение которой может быть спрогнозировано с учетом динамики изменения температуры фона.

Описание эксперимента и результаты

Определение температуры поверхности осуществляется с помощью специализированного стенда [6]. Конструкция стенда выполнена с учетом возможности получения временных зависимостей изменения температуры поверхности исследуемых образцов естественных сред при различных углах визирования. Для имитации источника солнечного излучения в составе стенда применяются галогенные лампы, интенсивность излучения которых подобрана с учетом интенсивности излучения Солнца. Приемником излучения является тепловизионная камера, работающая в инфракрасном диапазоне длин волн 8–12 мкм.

Исследуемые образцы естественных сред помещались в специальные кюветы из термоизоляционного материала и размещались в центре предметного столика стенда. После предварительного прогрева источника, его тепловое излучение облучало поверхность среды, тем самым подвергая ее нагреву. Изменение температуры фиксировалось тепловизионной камерой путем регистрации термограмм через временные интервалы, определенные с учетом времени проведения эксперимента. Полученные термограммы анализировались с помощью программного обеспечения, по результатам чего определялась средняя температура поверхности образца.

Для эксперимента были взяты образцы песка и грунта (чернозема). Выбранные среды характеризуются различными свойствами поглощения энергии и коэффициентами теплопроводности [1, 7]. На рис. 1 представлены графики зависимости температуры поверхности исследуемых образцов. Данные зависимости были получены в одних и тех же условиях, при угле визирования, равном 45° от нормали. Масса исследуемых фрагментов была одинакова и составляла 130 гр. Время эксперимента для каждого образца составляло 1,5 ч.

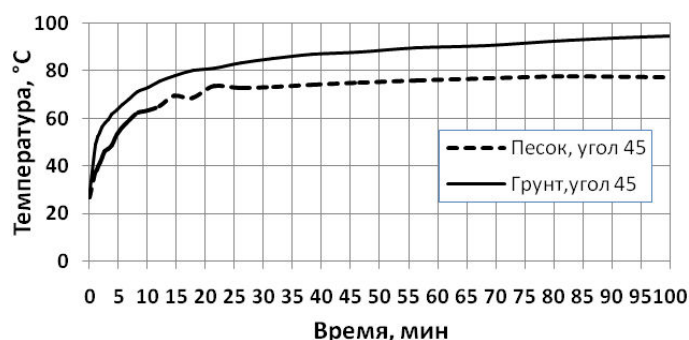


Рис. 1. Графики зависимости изменения температуры поверхности песка и грунта от времени

Как видно из приведенных зависимостей, температура поверхности образца песка за время эксперимента практически стабилизировалась по сравнению с температурой образца грунта. За 2 мин от начала эксперимента температура поверхности фрагмента грунта возросла и превышала температуру поверхности фрагмента песка почти в полтора раза. Таким образом, установлено, что передача тепла между слоями в образце грунта снижена по сравнению с образцом песка. При этом поверхность грунта обладает более высокими поглощающими способностями, что выражается в резком возрастании ее температуры уже на первой минуте эксперимента.

По данной методике были проведены исследования по оценке зависимости изменения температуры поверхности образцов грунта и песка от степени увлажненности при различных углах визирования. Измерения температуры поверхности проводились при углах визирования 30, 45, 60, 75°. Время эксперимента для каждого случая составляло 30 мин. Масса образцов была одинакова и составляла 130 гр без учета веса кюветы. Оценка массового отношения влаги в образцах проводилась по ГОСТ 28268-89. Результаты оценки температуры исследуемых образцов при различной степени увлажненности приведены на рис. 2.

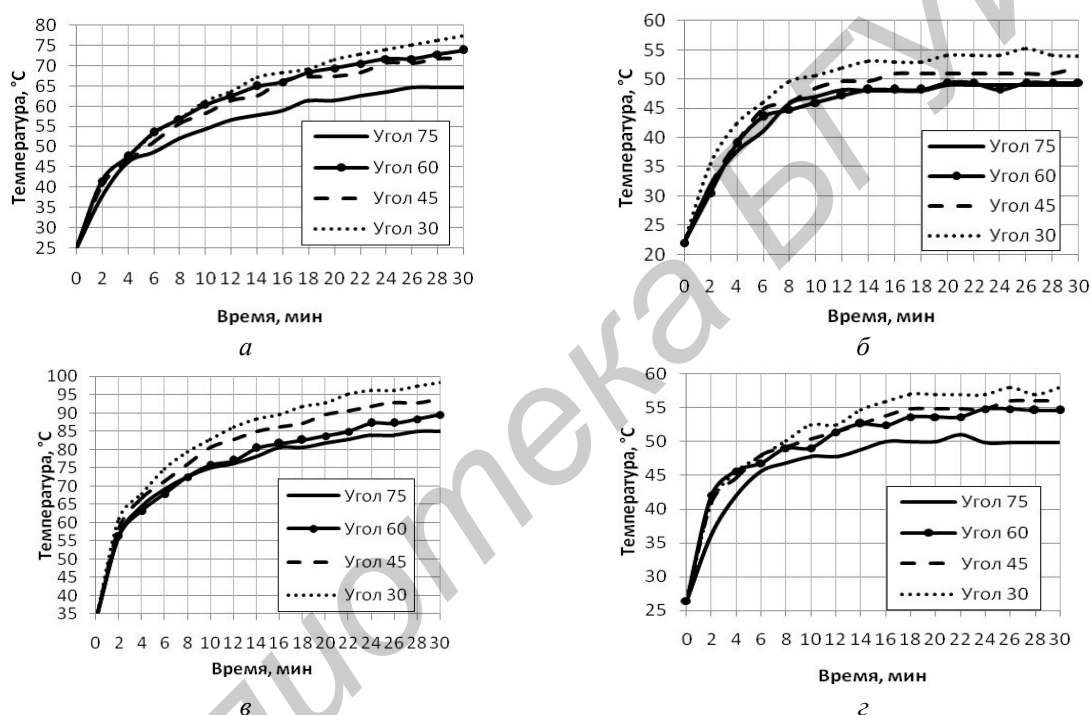


Рис. 2. Графики изменения температуры поверхности образцов при различных углах визирования и влажности: *а* – песок при влажности 1 %; *б* – песок при влажности 10 %; *в* – грунт при влажности 2 %; *г* – грунт при влажности 40 %

Увеличение массового отношения влаги в образце приводит к значительному снижению температуры нагрева поверхностей. Это связано с поглощением энергии излучения молекулами воды и, соответственно, ее испарением, что приводит к быстрой стабилизации температуры поверхности. При массовом отношении влаги 10 % в образце песка и 40 % в образце грунта, динамика изменения температуры сред становятся похожей, так как наполнителем выступает жидкость, характеризующаяся собственной теплопроводностью и влияющая на общую теплопроводность образца. Однако по своей структуре грунт является более гигроскопичным, чем песок, что сказывается на количестве влаги, необходимой для снижения времени наступления термодинамического равновесия.

Исследование особенностей нагрева поверхности фрагментов различных природных сред позволяет перейти к определению механизмов взаимодействия солнечного излучения с данными поверхностями. Однако в реальных условиях, при наличии постоянно изменяющихся условий среды, сложно предугадать дальнейшее изменение температуры изучаемых поверхностей. Поэтому следующим шагом в решении поставленной задачи

является аналитическое описание получаемых характеристик и выведение функции, описывающей исследуемый процесс с минимальной ошибкой аппроксимации с целью дальнейшего прогнозирования температурных изменений поверхностей природных сред.

При анализе экспериментально полученных закономерностей для определения функции аппроксимации была выбрана методика, основанная на электротепловой аналогии [8]. В данном случае фрагмент среды рассматривается в виде эквивалентной электрической схемы замещения. Описание изменения температуры поверхности образца осуществляется на основе описания электрических процессов, происходящих в эквивалентной схеме.

На рис. 3 показана упрощенная электрическая схема замещения, являющаяся электротепловым аналогом стационарного температурного режима нагрева исследуемого фрагмента естественной среды.

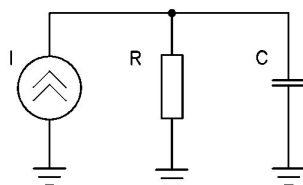


Рис. 3. Схема замещения фрагмента природной среды

Представленная схема является фильтром нижних частот. В данной схеме замещения электрическая емкость выступает аналогом теплоемкости вещества, электрическое сопротивление – тепловым сопротивлением вещества, т.е. $C \Rightarrow C_T$, а $R \Rightarrow R_T$ соответственно.

Так как излучаемая энергия, приходящаяся на единицу площади поверхности вещества, постоянна и не зависит от параметров облучаемой поверхности при постоянстве внешних условий, в схеме замещения эквивалентом потока энергии солнечного излучения является источник тока I . Таким образом, между слоями среды при нагреве образуется температурный градиент в направлении к более глубоко расположенным слоям фрагмента. Конечная температура поверхности обусловлена толщиной образца, а также его теплофизическими характеристиками. В общем случае процесс заряда электрической емкости, и как следствие, изменение разности потенциалов на ее обкладках во временной области описывается экспоненциальной функцией вида

$$U(t) = U_0 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \right], \quad (1)$$

где U_0 – разность потенциалов на обкладках конденсатора, достигаемая за время его полного заряда от нулевого значения, В; τ – постоянная времени цепи, с.

Так как данная схема выступает электротепловым аналогом среды, то изменение температуры на поверхности может описываться функцией заряда емкостного элемента (1). Соответственно, на основе электротепловой аналогии процесс изменения температуры поверхности образца будет описываться следующей функцией:

$$T(t) = T_n + (T_{\max} - T_n) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_{\text{cp}}}\right) \right], \quad (2)$$

где T_n – температура поверхности образца в начальный момент времени процесса нагрева, °С; T_{\max} – температура поверхности образца в момент времени, когда уже не наблюдается ее роста или снижения (температура термодинамического равновесия), °С; τ_{cp} – постоянная времени природной среды, с.

Постоянная времени цепи τ определяется как скалярное произведение электрической емкости на электрическое сопротивление рассматриваемого фильтра

$$\tau = R \cdot C. \quad (3)$$

Соответственно, для образца почвы, с площадью поверхности S и толщиной h , $\tau_{\text{ср}}$ будет определяться как

$$\tau_{\text{ср}} = R_T \cdot C_T. \quad (4)$$

Тепловое сопротивление и теплоемкость для данного образца определяются как

$$R_T = \frac{h}{\lambda \cdot S}, \quad (5)$$

$$C_T = c \cdot \rho \cdot V, \quad (6)$$

где λ – теплопроводность вещества, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К); ρ – плотность вещества, кг/м³.

Тогда, подставив в формулу (4) выражения (5) и (6), получим

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{c \cdot \rho \cdot h^2}{\lambda}. \quad (7)$$

На рис. 4 представлены экспериментально полученная временная зависимость температуры поверхности песка и график функции (2), описывающей процесс температурного роста на основании электротепловой аналогии. Экспериментальные данные были получены при угле визирования 45°. Для расчетов начальная температура $T_{\text{н}}$ была принята равной температуре песка в начальный момент времени эксперимента. Максимальная температура T_{max} была определена по графику экспериментальных значений с учетом момента наступления термодинамического равновесия температуры поверхности образца с окружающей средой.

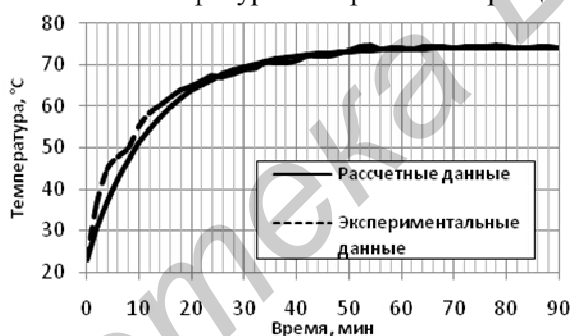


Рис. 4. Графики экспериментально полученных данных изменения температуры поверхности песка и расчетных данных

Для построения графика расчетной функции постоянная времени цепи $\tau_{\text{ср}}$ для образца песка, глубина которого составляла 14 мм, была равна 12 мин. Как видно из рисунка, расчетная функция аппроксимирует экспериментальную функцию с минимальным отклонением. Таким образом, данная функция может быть использована для прогнозирования температуры поверхности песка.

Заключение

В ходе проведенной работы были получены временные характеристики изменения температуры поверхности образцов грунта и песка. За счет различия в теплофизических характеристиках исследуемых образцов динамика нагрева их поверхностей при одинаковой массе фрагментов не соответствует друг другу. Насыщение влагой фрагментов природных сред кардинальным образом влияет на температуру их поверхности, позволяя ее охлаждать за счет испарения, тем самым снижая время наступления равновесной температуры. При этом определенное массовое отношение влаги в образцах может сделать схожими динамики их нагрева. Для прогнозирования температуры поверхности природных сред было предложено использовать метод электротепловой аналогии, позволяющий заменить фрагмент среды электрической схемой замещения для упрощения тепловых расчетов. На основании данного метода и получаемых экспериментальных данных для песка была выведена функция аппроксимации, позволяющая аналитически описывать процесс изменения температуры поверхности исследуемого образца.

Список литературы

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
2. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 416 с.
3. Энергетический расчет тепловизионных систем. Часть 1. Методика расчета дальности действия / В.М. Тымкул [и др.] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. С. 67–72.
4. Волков В.Г. Тепловизионные приборы для спецтехники // Спецтехника и связь. 2011. № 1. С. 2–10.
5. Поглотители электромагнитного излучения. Применение в вооруженных силах / Под ред. Л.М. Лынькова. Минск : Бестпринт, 2006. 228 с.
6. Стенд для оценки температуры поверхности фрагментов природных сред и их имитаторов / В.В. Лобунов [и др.] // Приборы и методы измерений. 2016. Т. 7, № 2. С. 145–151.
7. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционного исследования в геологии. М.: Мир, 1988. 343 с.
8. Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В. Основы технической теплофизики. М.: Изд-во Машиностроение-1, 2004. 172 с.
9. Ермуратский В.В. Методические основы определения приведенной пропускательно-поглощательной способности солнечного коллектора с абсорбером из полимерных труб // Проблемы региональной энергетики. 2009. № 3(11). С. 70–76.
10. Бологов А.Г. Метод определения температуропроводности почвы // Вестн. Алтайс. гос. аграр. ун-та. 2015. № 7 (129). С. 74–79.

References

1. Vavilov V.P. Infrakrasnaja termografija i teplovoj kontrol'. M.: ID Spektr, 2009. 544 s. (in Russ.)
2. Gossorg Zh. Infrakrasnaja termografija. Osnovy, tehnika, primenenie. M.: Mir, 1988. 416 s. (in Russ.)
3. Jenergeticheskij raschet teplovizionnyh sistem. Chast' 1. Metodika rascheta dal'nosti dejstvija / V.M. Tymkul [i dr.] // Interjekspos GEO-Sibir'-2013. S. 67–72. (in Russ.)
4. Volkov V.G. Teplovizionnye pribory dlja spectehniki // Spectehnika i svjaz'. 2011. № 1. S. 2–10. (in Russ.)
5. Poglotiteli jelektromagnitnogo izluchenija. Primenenie v vooruzhennyh silah / Pod red. L.M. Lyn'kova. Minsk: Bestprint, 2006. 228 s. (in Russ.)
6. Stend dlja ocenki temperatury poverhnosti fragmentov prirodnyh sred i ih imitatorov / V.V. Lobunov [i dr.] // Pribory i metody izmerenij. 2016. T. 7, № 2. S. 145–151. (in Russ.)
7. Kronberg P. Distancionnoe izuchenie Zemli: osnovy i metody distancionnogo issledovanija v geologii. M.: Mir, 1988. 343 s. (in Russ.)
8. Fokin V.M., Bojkov G.P., Vidin Ju.V. Osnovy tehnicheckoj teplofiziki. M.: Izd-vo Mashinostroenie-1, 2004. 172 s. (in Russ.)
9. Ermuratskij V.V. Metodicheskie osnovy opredelenija privedennoj propuskatel'no-pogloshhatel'noj sposobnosti solnechnogo kollektora s absorberom iz polimernyh trub // Problemy regional'noj jenergetiki. 2009. № 3(11). S. 70–76. (in Russ.)
11. Bolotov A.G. Metod opredelenija temperaturoprovodnosti pochvy // Vestn. Altajs. gos. agrar. un-ta. 2015. № 7 (129). S. 74–79. (in Russ.)

Сведения об авторах

Лобунов В.В., аспирант кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Борботко Т.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Lobunov V.V., graduate student of information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Borbotko T.V., D.Sci., professor, chief of information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-854-43-70;
e-mail: byjazzfusion@gmail.com
Лобунов Вадим Викторович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university of
informatics and radioelectronics
tel. +375-29-854-43-70;
e-mail: byjazzfusion@gmail.com
Lobunov Vadim Viktorovich