International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДА ПРЕХОДНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТ ЛИНЕЕН ИЗТОЧНИК НА ТОПЛИНА ЗА ИЗМЕРВАНЕ ТЕРМИЧНИТЕ СВОЙСТВА НА ВЛАЖНИ ПОРЕСТИ МАТЕРИАЛИ

Христо Христов

Технически университет - Габрово, ул. Х. Димитър 4, Габрово, България
[2]Организация, Адрес, Град, Държава
**кореспондиращ автор: christo@tugab.bg*

APPLICATION OF THE TRANSIENT LINE SOURCE (TLS) METHOD TO MEASUREMENT THERMAL PROPERTIES OF WET POROUS MATERIALS

Hristo Hristov

Technical University of Gabrovo, 4 H. Dimitar Str., Gabrovo, Bulgaria
**Corresponding author: christo@tugab.bg*

Abstract
The Transient Line Source (TLS) method is a straightforward, portable method for testing the thermal conductivity of various materials, mainly soil, rocks, concrete, and polymers. The TLS method utilizes a long, thin needle or probe that acts as a heat source and a resistance thermometer. The needle is inserted fully into the sample, and the material is heated for a set time while temperature measurements are taken at constant intervals. During the cooling period, temperature readings are retaken at the same intervals.

Keywords: The Transient Line Source (TLS) method; thermal conductivity measurement.

ВЪВЕДЕНИЕ

Термичните свойства са съществени за материалите, особено при специфичните им приложения в енергетиката. Топлопроводимостта е способността на материала да пренася топлина. Термичното съпротивление, обратното на проводимостта, илюстрира как един материал ще се съпротивлява на преноса на топлина. Обемният топлинен капацитет е топлината, необходима за повишаване на температурата на единица обем с 1 °C, а термичната дифузия е мярка за това колко бързо топлината ще се движи през веществото. Преходните методи [2], [3], [4] могат да се използват за измерване на топлопроводимост и термично съпротивление в течности и отговарят на стандартите ASTM D5334-22a [11] и IEEE 442-2017 [11]. Движението на влагата не е единственият проблем, с който се сблъскват изследователите/ инженерите, когато правят измервания на термични свойства [5], [6]. Промените в околната температура от хилядна от градуса в секунда, например от затоплянето на почвата от слънцето, могат да нарушат точността на изчисленията на термичните свойства [9], [10]. Редица производители като Thermtest, DatapointLabs,

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

C-Therm, TA Instruments, METER Group и др. използват метода в произвежданите от тях стационарни и преносими измервателни прибори.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Стандартната техника за измерване на термични свойства се нарича „техника на стационарно състояние“. Техниката на стационарно състояние изисква топлина да се подава, след като няма температурни промени с течение на времето. В стационарно състояние се измерва температурният градиент и плътността на топлинния поток, за да се определят термичните свойства на измервания материал.

При метода с преходни характеристики от линеен източник на топлина, топлината се прилага към нагревател вътре в малка игла (приближаваща се до линеен източник на топлина). Температурата вътре в иглата, а понякога и в съседство с нея, се измерва и данните за температурата и вложената топлина се използват за определяне на термичните свойства на материала, обграждащ иглата. Топлината се прилага само за кратко време и температурата се измерва, докато материалът се нагрява и охлажда. Техниката на стационарно състояние използва прости уравнения, но въпреки това, може да отнеме цял ден, за да се извърши измерване, поради дългото време за постигане на установен режим. По-голям проблем възниква, при опитите да се поддържа температурен градиент във влажен порест материал. Водата се отдалечава от нагрятата зона и кондензира върху студената зона, а термичните свойства на материала се променят - променяйки показанията на уреда. Следователно е трудно да се измерят термичните свойства на влажни, порести материали, използвайки метода на стационарно състояние.

Методът чрез използване на преходни характеристики от линеен източник на топлина обаче е в състояние да измери термичните свойства на влажни, порести материали, тъй като топлината се прилага само за кратко време методи [2], [3], [4]. Температурните градиенти в течностите също причиняват свободна конвекция, която променя видимите термични свойства.

Методите за измерване на топлопроводимостта на порести материали чрез използване на преходни характеристики от линейни източници на топлина се използват от над 60 години. Обикновено сондата за това измерване се състои от игла с нагревател и температурен сензор вътре. Пропуска се електрически ток през нагревателя и системата следи температурата на сензора с течение на времето [7], [8], [9]. Анализът на зависимостта на температурата на сензора от времето, когато сондата е в тествания материал, определя топлопроводимостта. Съществуват и конструкции, при които нагревателят и температурните сензори са поставени в отделни игли. При сензора с двойна сонда /игла/ анализът на зависимостта температура-време за отделните сонди дава информация за дифузионността и топлинния капацитет, както и за проводимостта.

Идеалният сензор има много малък диаметър и е приблизително 100 пъти по-дълъг от своя диаметър. Сензорът е в тесен контакт с околния материал и измерва температурата на материала по време на нагряване и охлаждане. В идеалния случай температурата и съставът на въпросния материал не биха се променяли по време на измерването. Реалните сензори не отговарят на идеалните по следните причини.

• Сензорите, достатъчно малки, за да бъдат идеални, биха били твърде крехки за повечето приложения.

• Измерванията във външна среда включват променящи се температури; околната температура обикновено не е постоянна.

• Нагряването на влажни и ненаситени порести материали води до отдалечаване на влагата от източника на топлина,

променяйки съдържанието на влагосъдържанието в областта на измерване.

• Отворът, направен за сондата, често нарушава структурата на материала около него, причинявайки контактно съпротивление между сензора и материала. Проектирането на сензор, който дава точни измервания при всякакви условия, е предизвикателство:

- ✓ Ако сензорът е твърде малък, той е крехък и контактното съпротивление може да бъде високо в сухи, порести материали.
- ✓ Големите сензори изискват дълго време за нагряване, което може да промени показанията, като отблъсква влагата от сензора и може да причини свободна конвекция в течни проби, което променя показанията.
- ✓ Високата скорост на нагряване прави температурните промени полезни за отчитане и по-малко податливи на грешки от температурен дрейф, но също така води до движение на влагата извън зоната на измерване и причинява свободна конвекция в течности.

Поради това се препоръчват дълги времена за нагряване, за да се минимизира контактното съпротивление, но те водят до изтласкване на влагата далеч от сензора.

За подобряване точността на измерването редица съвременни измервателни прибори поддържат времето за нагряване възможно най-кратко, за да се минимизира термично предизвиканото движение на водата и да се намали времето, необходимо за измерване. Подаването на топлина също е ограничено, за да се сведе до минимум движението на водата и свободната конвекция. Използването на относително кратки времена за нагряване и ниски скорости на нагряване изисква измервания на температурата с висока резолюция и специални алгоритми за измерване на термичните свойства. Интервалите на промяна на температурата са ±0,001 °C, същевременно се определя скоростта на температурния дрейф преди измерването, за да коригира отчитането на дрейфа.

В миналото температурните данни, получени от температурни сонди са преобразувани в термични свойства, използвайки приближение към решението за безкрайните линии на източника на топлина [1]. В някои случаи това решение води до добри резултати, но в други резултатите са твърде негативни. Blackwell (1954) [2] предоставя точно решение за нагрята сонда с краен диаметър и контактно съпротивление, но то не може да се използва директно за анализ на данни във времевата област, защото е в преобразование на Лаплас. През 2012 г. е публикуван метод, който трансформира решението на Blackwell [2] във времевата област [7] (Knight et al. 2012). Инвертирането на модела на Knight et al. [7] изисква повече изчислителна мощност, отколкото е налична в микропроцесор, работещ с батерии, което налага генериране на данни за широк диапазон от известни термични свойства, използвайки модела на Knight et al. [7], и след това се търсят корекции на инверсиите, базирани на линейните топлинни източници, които да съответстват на известни термични свойства. Алгоритмите след това трябва да се проверят върху реални проби с известни термични свойства. Този метод позволява използването на кратки времена за нагряване и все пак избягва проблеми с контактното съпротивление и ефектите на дифузия на пробата.

Алгоритъм с две игли.

Към нагревателната игла се прилага топлина за зададено време на нагряване, t_h, като температурата се регистрира от измервателната игла по време на нагряване и по време на последващи период на охлаждане. След това показанията се обработват чрез изваждане на околната температура и скоростта на дрейфа. Получените данни са подходящи за изчисления по (1) и (2), като се използва най-малко квадратна процедура.

$$\Delta T = \left(\frac{q}{4\pi k}\right) Ei\left(\frac{-r^2}{4Dt}\right) t \le t_h \quad (1)$$

$$\Delta T = \left(\frac{q}{\pi k}\right)\left\{Ei\left[\frac{-r^2}{4D(t-t_h)}\right] - Ei\left[\frac{-r^2}{4Dt}\right]\right\}$$

$$t > t_h \quad (2)$$

където:

ΔT – нарастване на температурата в измервателната игла;

q – топлина подавана към измервателната игла, W/m;

k – термична проводимост W/mK;

r – разстояние от нагряващата игла до измервателната игла;

D – термичната дифузия, m^2/s;

t_h – време нагряване, s;

t – време, s;

Ei – експоненциален интеграл, апроксимиран с използване на полиноми.



***Фиг. 1**. Сонда с две игли*

При използване на две игли приборите събират данни в продължение на поне 30 секунди, за да определи температурния дрейф. Ако дрейфът е под допустим праг, към нагревателната игла се подава ток за 30 секунди. През това време се следи температурата на сензорната игла. След 30 секунди токът се изключва и температурата се измерва за още 30 секунди. След това началната температура и дрейфът се изваждат от температурите, като определят стойностите на ΔT, необходими за решаване на уравнение (1) и уравнение (2). Стойностите на q, r, t и t_h вече са известни, така че след това е необходимо решаване за k и D. Това може да се направи с помощта на традиционни нелинейни най-малки квадрати (Marquardt 1963) [8], но тези методи често се забиват в локални минимуми и не успяват да дадат правилния резултат. Ако е избрана стойност за D в уравнение (1) и уравнение (2), изчислението се превръща в линейна задача с най-малки квадрати. Следващата стъпка е да се търси стойността на D, която минимизира квадратите на разликите между измерената и моделираната температура. Този метод дава глобалния минимум и, ако е структуриран правилно, е толкова бърз, колкото традиционните нелинейни най-малки квадрати. След като k и D са определени, обемният специфичен топлинен капацитет може да се изчисли с помощта на уравнение (3).

$$\rho C = \frac{k}{D} \quad (3)$$



***Фиг. 2**. Сонда с една игла*

Алгоритъм с една игла

Както при сензора с две игли, температурата на сондата се следи поне 30 s, за да се определи температурният дрейф. Началната температура и дрейфът след това се изваждат от измерванията. След това през нагревателя се пропуска ток в продължение на 60 секунди, докато температурата на сондата се следи. Ако иглата беше линеен източник на топлина, уравнение (1) би могло да се използва за предсказване на нейната температура. Когато уравнение (1) се използва за анализ с единична игла, експоненциалният интеграл се разлага в безкраен ред и се запазва само първият член в разлагането, както е показано в уравнение (4). Това е уравнението, използвано в режим ASTM/IEEE. Предполага се, че това раз-

лагане се прилага само при дълги времена на нагряване, така че данните от ранните времена се изключват от анализа.

$$\Delta T = \left(\frac{q}{4\pi k}\right) lnt + C \qquad (4)$$

Уравнение (4) показва, че проводимостта е пропорционална на обратната величина на наклона, когато температурата е нанесена спрямо *lnt*. При дълги времена температурата почти не се променя, така че шумът в измерванията може силно да повлияе на измерването. Част от проблема с по-кратките времена за измерване е, че пренебрегнатите членове в експоненциалното интегрално разлагане са функции на дифузионността, така че дифузионността на пробата влияе върху оценките на проводимостта. По-голям проблем обаче е, че линейният източник на топлина няма топлинен капацитет, а реалната сонда има значителен топлинен капацитет. Друг проблем е, че често има контактно съпротивление между сондата и средата, в която е поставена. За да се изследват тези ефекти, е използван моделът на Knight et al. (2012)[7] за симулиране на сензорни данни за широк диапазон от проводимости, дифузионности и контактни съпротивления. След приспособяване на уравнение 4 към тези данни, се установява, че най-големият проблем е във времевата скала.

$$\Delta T = \left(\frac{q}{4\pi k}\right) ln(t + t_o) + C \qquad (5)$$

При използване на уравнение (5) t_o е времево отместване, всички данни се съчетават добре с времена на нагряване от 60 s. Ефектите на контактното съпротивление и дифузионността се елиминират или значително намаляват. Стойностите на *k*, t_o и *C* се определят чрез метода на най-малките квадрати. Това е друга нелинейна задача с най-малки квадрати, която може да бъде решена с помощта на традиционни методи (Marquardt 1963) [8]. Тя се решава чрез различен итеративен метод. Предоставят се стойности на и се намира тази, която минимизира стандартната грешка на оценката. Тази процедура е използвана върху проби с известна проводимост, като например глицерин и агарова вода, както и върху суха и влажна почва, 1-минутните показания на всички тези проби са по-точни от 10-минутните показания, използващи уравнение (4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методът на преходните характеристики от линеен източник е ефективен при измерване абсолютната топлопроводимост и съпротивление на различни проби, включително почва, бетон и полимери. В сравнение с други, едно от значителните предимства на този метод е бързото му време за тестване, преносимостта и способността за тестване на пореста и влажни материали. Познаването и разбирането на топлопроводимостта на материалите позволява на хората да постигнат най-добри резултати от предмети, използвани в ежедневието. Методът е на преходните характеристики от линеен източник е лесен и надежден, с безкрайни приложения в строителството, енергетиката и екологичната индустрия. Тъй като търсенето на точни данни за топлопроводимостта на порестите материали продължава да расте, методът на преходните характеристики от линеен източник е готов да играе жизненоважна роля при избора на материали, оптимизацията на процесите и технологичния напредък в различни области.

БЛАГОДАРНОСТИ: *Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“*

ЛИТЕРАТУРА

[1] Abramowitz, Milton, and Irene A. Stegun. Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables. Vol. 55. New York: Dover publications, 1972.

[2] Blackwell, JHl. "A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk part I—Theory." Journal of applied physics 25, no. 2 (1954): 137-144.

[3] Bristow, Keith L., Ronald D. White, and Gerard J. Kluitenberg. "Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating." Soil Research 32, no. 3 (1994): 447-464.

[4] Bruijn, Pieter J., I. A. Van Haneghem, and Jacob Schenk. "An improved non-steady state probe method for measurements in granular materials. Part I: Theory." (1983).

[5] Campbell, Gaylon S. Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil-Plant Systems. Elsevier, New York, 1985

[6] Carslaw, H. S., and J. C. Jaeger. Conduction of heat in solids: Oxford Science Publications. Oxford, England, 1959.

[6] Kluitenberg, G. J., J. M. Ham, and Keith L. Bristow. "Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity." Soil Science Society of America Journal 57, no. 6 (1993): 1444-1451.

[7] Knight, John H., Gerard J. Kluitenberg, Tamir Kamai, and Jan W. Hopmans. "Semi-analytical solution for dual-probe heat-pulse applications that accounts for probe radius and heat capacity." Vadose Zone Journal 11, no. 2 (2012).

[8] Marquardt, Donald W. "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters." Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics 11, no. 2 (1963): 431-441.

[9] Shiozawa, Sho, and Gaylon S. Campbell. "Soil thermal conductivity." Remote Sensing Reviews 5, no. 1 (1990): 301-310.

[10] Van Haneghem, I. A., J. Schenk, and H. P. A. Boshoven. "An improved non-steady state probe method for measurements in granular materials Part II: Experimental results." (1983).

[11] ASTM D5334-22a, Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure.

[12] IEEE 442-2017 IEEE Guide for Thermal Resistivity Measurements of Soils and Backfill Materials.