

## ТОПЛИННО-ИМПУЛСНИ ДАТЧИЦИ ЗА ВЛАЖНОСТ НА ПОЧВА ЗА ЦЕЛИТЕ НА КОСМИЧЕСКОТО РАСТЕНИЕВЪДСТВО

Пламен Костов

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките  
e-mail: plamen\_kostov@space.bas.bg*

**Ключови думи:** датчици за влажност на почва, субстрат „Балканин“, субстрат „Турфейс“, топлинно-импулсен метод, микрогравитация.

**Резюме:** Въз основа на опита ни от проектирането и използването на датчици за влажност на изкуствени почви (субстрати) за отглеждане на висши растения в условия на микрогравитация, бяха създадени нови прототипи на топлинно-импулсни датчици (сонди). Един от тях използва наша оригинална разработка – повишението на температурата на сондата е постоянно при всяко загряване, а продължителността на топлинния импулс се влияе от влажността на субстрата. Друга група датчици работи на принципа на постоянен топлинен импулс, който предизвиква различни нараствания на температурата на сондата, в зависимост от влажността на околния субстрат. Докладвани са техническите параметри на проектираните датчици и калибрационните процедури. Представени са калибрационни уравнения на сондите за влажност и на температурните датчици. Анализирани са факторите, които определят общата точност на датчиците.

## HEAT-PULSE SOIL MOISTURE PROBES FOR SPACE PLANT GROWTH SYSTEMS

Plamen Kostov

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: plamen\_kostov@space.bas.bg*

**Key words:** soil moisture sensors, Balkanine substrate, Turface substrate, heat-pulse method, microgravity.

**Abstract:** Based on our experience in the design and use of substrate moisture sensors for growing higher plants in microgravity, new heat-pulse sensor prototypes were created. One of them uses our original design – the duration of the heat pulse is influenced by the substrate moisture so that the temperature rise of the probe to be constant. Other sensors generate constant heat pulse, which increases the probe temperature with value that is a function of substrate moisture. The technical parameters of the designed sensors and calibration procedures are reported. The calibration equations for moisture probes and temperature sensors are presented. Factors that determine the overall accuracy of the sensors are analyzed.

### Въведение

Подходящият воден статус на почвата е необходимо условие за правилното развитие на растенията както на Земята, така и в условия на микрогравитация. Измерването на водния потенциал в зоната на корените на растенията отчита най-добре способността на почвата да осигури вода и хранителни вещества на растенията. Тензиометърът измерва директно общия воден потенциал в порите на почвата и се използва широко на Земята [1]. Неговата трудоемка начална подготовка за работа, ограничени диапазон и време на измерване възпират използването му в микрогравитация. Съществува връзка между водния потенциал и водното съдържание за всяка пореста среда, която дава възможност да се измерва параметъра „водно съдържание“ с помощта на стабилни, дълготрайни и точни датчици за влажност на почва.

Методите за измерване на влажността на почвата са известни отдавна и непрекъснато се усъвършенстват. По-важните от тях са: Гравиметричен метод – стандарт на Земята; Ядрени методи – неутронно разсейване, гама затихване, ядрено магнитен резонанс; Електромагнитни

методи – съпротивителен датчик, капацитивен датчик; Time-Domain Reflectometer (TDR); Frequency-Domain Reflectometer (FDR) и др. Ограниченията, свързани с безопасността на екипажите в обитаемите космически обекти, правят използването на гореизброените техники неприложими в бордови оранжерии. Единственият наложил се датчик за влажност на почвата в микрогравитация работи на основата на топлинно-импулсна техника.

Първите изпитания на топлинно-импулсни датчици, разработени в ИКИТ-БАН, България, са проведени през 1984-1985 г. на орбиталната станция (ОС) „Салют-7“ – експеримент „Субстрат“. В периода 1990-2000 г. са използвани датчици за бордовите експерименти по проекта космическа оранжерия (КО) „Свет“ на ОС „Мир“, в ИКИ-БАН (България), ИМБП (Русия) и SDL, Utah (USA) [2, 3]. Датчици от същият тип (SDL, Utah, USA) се използват в руската КО „Лада“, работеща на Международната космическа станция.

В процеса на работата по създаването на макет на космическа оранжерия от затворен тип „Свет-3“, възникна необходимост от проектиране на нова гама датчици от топлинно-импулсен тип, с подобрени експлоатационни качества, за изследване на разпределението на влажността в обема на субстрата (изкуствена почва за космически цели).

Проектът има следните – *Цел*: Да се измерват температурата и влажността на субстратни среди в условия на микрогравитация. Да се управлява обемната влажност на субстрата; *Задачи*: (1) Да се проектират и конструират нови прототипи на датчици за температура и влажност на субстрати и (2) Да се определят калибровъчните характеристики на датчиците; *Предмет на изследването*: Влажността на различни субстрати при съдържание на влага от въздушно-сухо състояние до насищане.

## Методи и материали

### ТЕОРЕТИЧНА ОБОСНОВКА

Топлинната проводимост на субстрата е зависима от неговите физически свойства (структура, текстура); обемна плътност (порестост); температура ( $T < 0^{\circ}\text{C}$  и  $T > 70^{\circ}\text{C}$ ); и от съдържанието на вода и въздух в порите. Съществени разлики в топлинните проводимости на отделните съставки, съдържащи се във всяка почва, (въздух –  $0,024 \text{ [W/(m.K)]}$  при  $25^{\circ}\text{C}$ ; вода (течна) –  $0,58$ ; субстрат, почва –  $0,2 \div 1,5$ ), дават възможност топлинната проводимост на субстрата да бъде измерена точно, а нейната зависимост от влажността на субстрата (от въздушно-сух до наситен) да бъде определена чрез калибровъчна процедура.

*Blackwell* [4] и *de Vries* [5] предлагат решение на зависимостта на повърхностната температура  $\Delta T$  на цилиндър с крайни размери (т.е. термосонда) от времето за загряването ѝ  $t$ .

$$(1) \quad \Delta T = \frac{P}{4\pi K} \left[ \ln(t) + \ln \frac{4\alpha}{r^2} - \gamma + \frac{2K}{rH} \right]$$

където:  $\Delta T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] е нарастване на температурата на сондата след време  $t$ ;  $P$  [ $\text{W/m}$ ] е линейната топлинна (електрическа) мощност на нагревателя;  $K$  [ $\text{W}/(^{\circ}\text{C.m})$ ] е топлинна проводимост;  $t$  [s] е времето на загряване;  $\alpha$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] е топлинна дифузия;  $r$  [m] е радиус на сондата;  $\gamma$  е константа на Ойлер ( $0,5772$ );  $H$  [ $\text{W}/(^{\circ}\text{C.m}^2)$ ] е коефициент на топлинен пренос.

Уравнение (1) може да се представи във вида –

$$(2) \quad \Delta T = A \ln(t) + B, \text{ където } A = \frac{P}{4\pi K}$$

и представлява наклона на линейния участък от кривата  $dT/d[\ln(t)]$ , а  $B$  е константа.

Следователно, топлинната проводимост  $K$  на средата около сондата може да бъде определена от израза –

$$(3) \quad K = \frac{P}{4\pi A}$$

Съществуват две възможности за използване на описания метод при определяне на температурната проводимост на средата, в която е поставена сондата:

*Датчик от I тип.* Сондата се нагрява до достигане на постоянен температурен прираст  $\Delta T$  над температурата на средата преди загряването  $T_0$  и се отчита времето за това загряване  $t$ . Тогава топлинната проводимост  $K$  се определя с израза –

$$(4) \quad K = \frac{P}{4\pi \cdot (\Delta T = \text{const.})} \cdot \ln(t)$$

Датчик от II тип. Сондата се нагрява за постоянно време  $t$  и се измерва температурния прираст  $\Delta T$ . Топлинната проводимост се определя с израз –

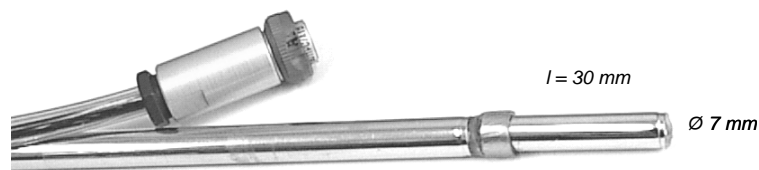
$$(5) \quad K = \frac{P \cdot \ln(t = \text{const.})}{4\pi} \cdot \frac{1}{\Delta T}$$

Различният почвен материал, индивидуалната порестост на всеки от тях, както и други параметри на средата влияят върху топлинната проводимост със съизмерима степен на влиянието на влажността. Това е причината всеки датчик от топлинно-импулсен тип да има индивидуална калибровъчна характеристика  $\Theta=f(K)$ , или  $\Theta=f(t)$ , за всяка конкретна среда, в която е планирано да бъде използван. Тук  $\Theta$  е обемната влажност на средата.

#### КОНСТРУИРАНЕ И КАЛИБРОВКА

Конструиране на сонда от I тип,  $\Theta = f(t)$  при  $\Delta T = \text{const.}$

На фигура 1 е представен външния вид на сондата, проектирана и изработена за измервания на влажността на по-едри фракции от субстрати (1,0÷3,5 mm). Нейните основни технически характеристики са следните: обща дължина на сондата – 150 mm; дължина на активната част – 30 mm; диаметър на активната част – 7 mm; нагревателен елемент – резистор 100  $\Omega$ , 0,1%, 2 W, 50 ppm/°C; захранване на нагревателя –  $U = 12$  V stab. или  $I = 0,12$  A stab.; температурен датчик – SMT160-30M, Smartec, Duty cycle (D.C.) output; механична и химична устойчивост – херметизиран, тънкостенна тръба с антикорозионно покритие; софтуер – управлява нагревателя, измерва  $T$ ,  $t$  и изчислява  $\Theta$ ; изчисление на D.C.=0,320+0,00470\* $T$ , където  $T$  = температура в °C.



Фиг. 1. Външен вид на сонда от I тип с активна дължина 30 mm и диаметър 7 mm

#### Калибрационна процедура на сонда от I тип в индустриален пясък и субстрат „Турфейс“

В съд с размери ДхШхВ 90x64x34 mm е насипан и уплътнен промит индустриален пясък до плътност 1,594 g/cm<sup>3</sup>, фракционен състав 1,0÷2,0 mm и с обемна хигроскопична влажност 4,1%. Добавена е вода до насищане 74,7 ml, а изчислената обемна влажност при насищане е  $\Theta=0,434$  cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>. Водата в съда се изпарява свободно през горната открита повърхност на влажния субстрат до достигане на постоянна маса на въздушно-сух субстрат. Текущата маса на изпаряващата се вода се измерва с електронна тегилка Mettler PM34-K. През интервал от един час се подава електрически импулс на нагревателя на сондата с мощност 42 W/m, при което се измерва времето на нагряване  $t$ , необходимо за температурно нарастване  $\Delta T=3,5$ °C. Продължителност на процедурата – около 11 денонощия.

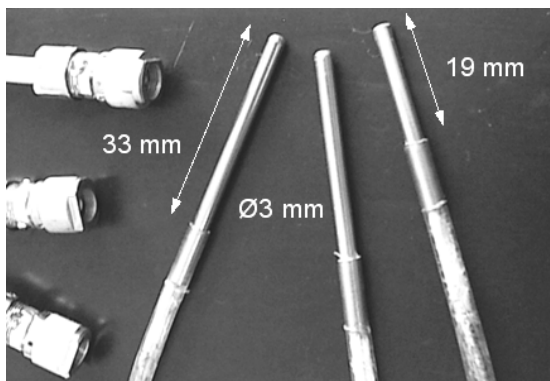
В същия съд е насипан и уплътнен субстрат „Турфейс“ до плътност 0,702 g/cm<sup>3</sup>, фракционен състав 1,0÷2,0 mm и с обемна хигроскопична влажност 2,2%. Добавена е вода до насищане 115,4 ml, а изчислената обемна влажност при насищане е  $\Theta=0,630$  cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>. Измерва времето на нагряване  $t$ , необходимо за температурно нарастване  $\Delta T=5,0$ °C по аналогична на гореописаната циклограма. Продължителност на процедурата – около 18 денонощия.

#### Калибрационна процедура на сонда от I тип в субстрат „Балканин“

В съд с размери ДхШхВ 134x134x56 mm е насипан и уплътнен субстрат „Балканин“ до плътност 0,909 g/cm<sup>3</sup>, фракционен състав 1,0÷2,0 mm, и с обемна хигроскопична влажност 7,1%. Добавена е вода до насищане 489,2 ml, а изчислената обемна влажност при насищане е  $\Theta=0,551$  cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>. Измерва се времето на нагряване  $t$ , необходимо за температурно нарастване  $\Delta T=7,0$ °C. Продължителност на измерването – около 24 денонощия.

Конструиране на сонди от II тип,  $\Theta = f(\Delta T)$  при  $t = \text{const.}$

На фигура 2 е представен външния вид на три сонди, проектирани и изработени за измервания на влажността на ситни субстратни фракции (<1,5 mm). Основните технически характеристики на тези сонди са следните:



Дължина на активната част – 19 и 33 mm;  
 Диаметър на активната част – 3 mm;  
 Захранване на нагревателя –  $I = 0,05 \text{ A stab.}$ ;  
 Време на загряване – 15 s.  
 Температурен датчик – аналогов изход;  
 Кабелна връзка с електр. – 1-жилна, екранирана;  
 Антикoroзионно покpитие, херметизиран;  
 Софтуер – управлява нагревателя, измерва температурата  $T$ , изчислява  $\Theta$ ;  
 Калибрационни уравнения за температурните датчици:

$$T_I = -155,46 \cdot U_{\text{sensorI}} + 453,35$$

$$T_{II} = -156,9 \cdot U_{\text{sensorII}} + 457,01$$

$$T_{III} = -307,75 \cdot U_{\text{sensorIII}} + 444,44$$

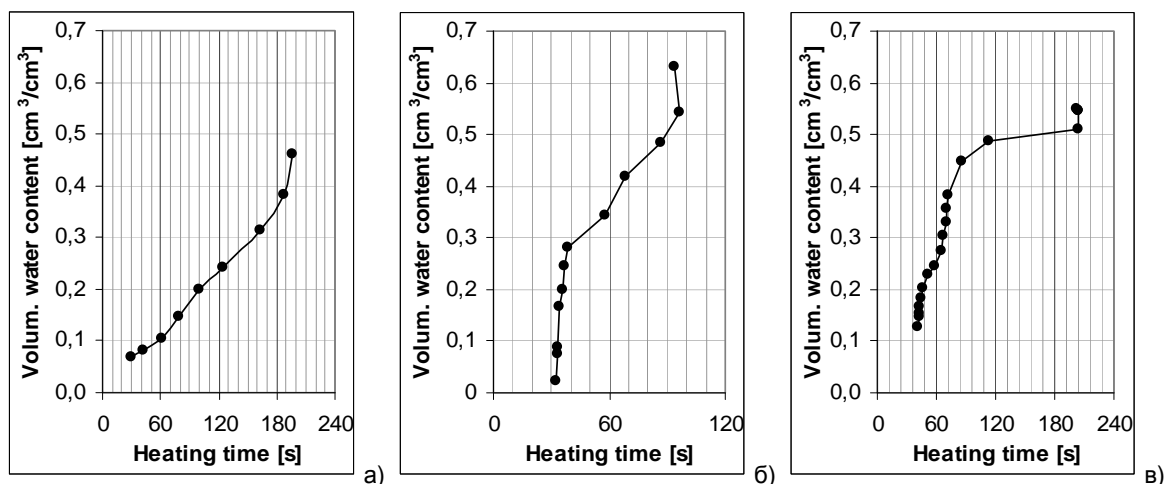
Фиг. 2. Външен вид на три сонда от II тип с активни дължини 19 и 33 mm (2 броя) и диаметър 3 mm

#### Калибрационна процедура на сонди от II тип

В съд с размери ДхШхВ 168х68х30 mm е насипан и уплътнен субстрат „Балканин“ до плътност  $0,878 \text{ g/cm}^3$ , фракционен състав  $1,0 \div 1,5 \text{ mm}$  и обемна хигроскопична влажност 3,52%. Добавена е вода до насищане 181,1 ml, а изчислената обемна влажност при насищане е  $\Theta = 0,573 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . През интервал от един час се подава електрически импулс на нагревателя на сондата с мощност  $29 \text{ W/m}$  и продължителност 15 s, след което се измерва температурното нарастване на сондата с помощта на температурния датчик. Продължителност на измерването – около 14 денонощия.

#### Резултати

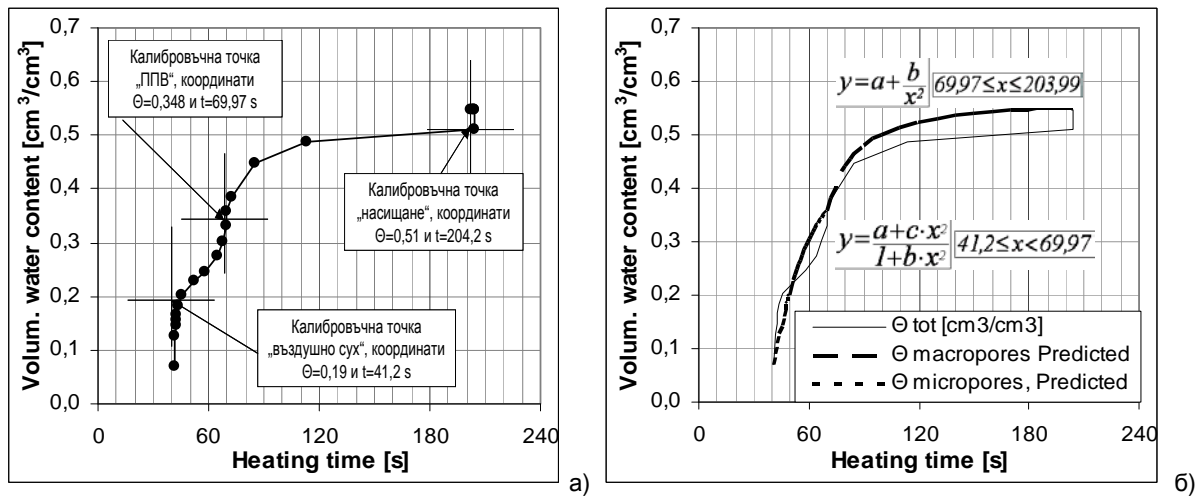
**Датчик от I тип** – Данните от калибровките на датчика в трите субстрата са представени на фигура 3. В допълнение към получените резултати трябва да се отбележат следните важни особености на трите субстрата, които имат влияние върху формата на получените характеристики – индустриалният пясък притежава практически само макропорестост; субстрат „Турфейс“ съдържа макропори и микропори, съсредоточени в диапазона  $10 \div 100 \mu\text{m}$ ; субстрат „Балканин“ съдържа макропори и микропори, съсредоточени в диапазона  $< 10 \mu\text{m}$ . Тези разпределения на поровите пространства в изследваните субстрати обясняват съществените разлики в калибрационните характеристики на датчика за всеки от тях.



Фиг. 3. Експериментални данни от датчик I тип за трите субстрата –  $\Theta = f(t_{\text{heating}})$  а) индустриален пясък,  $\Delta T = 3,5^\circ\text{C} = \text{const.}$ ; б) субстрат „Турфейс“,  $\Delta T = 5,0^\circ\text{C} = \text{const.}$ ; в) субстрат „Балканин“,  $\Delta T = 7,0^\circ\text{C} = \text{const}$

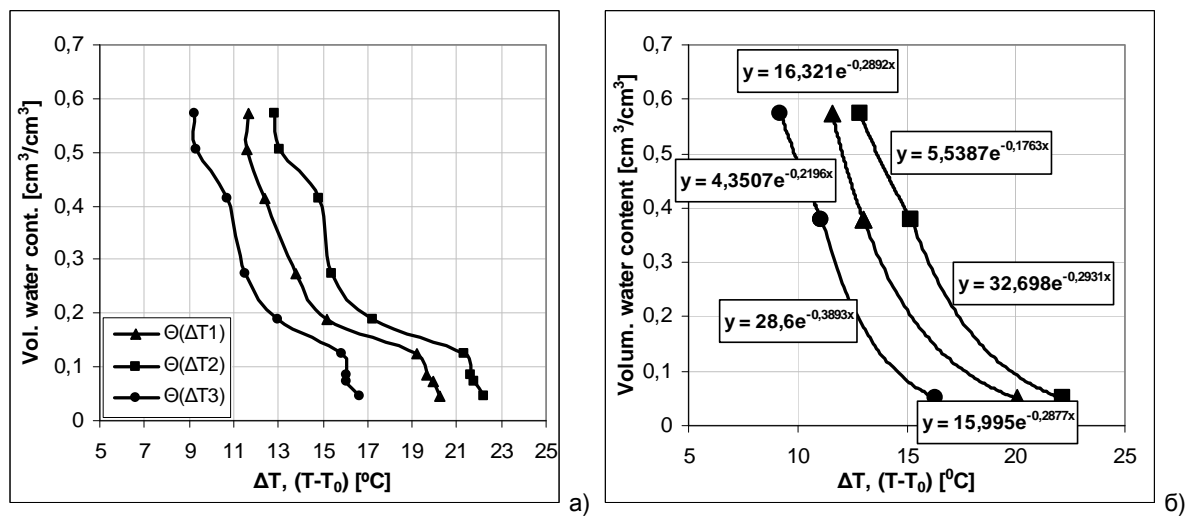
Друг параметър на датчика, който е необходимо да бъде отчетен при интерпретацията на данните, е зоната на чувствителност. Могат ясно да се различат вертикалните участъци на

кривите при обемни влажности под  $0,3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  и над  $0,55 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  за фигура 3.б. и съответните на фигура 3.в. Графично пояснение за влиянието на зоната на чувствителност върху калибровъчната процедура и калибрационните уравнения е направено на фигура 4.



Фиг. 4. а) Влияние на зоната на чувствителност на датчика върху експерименталните данни, например, за субстрат „Балканин“, фракция 1,0-1,5 mm; б) Калибровъчни уравнения на датчика за субстрат „Балканин“, фракция 1,0-1,5 mm.

Датчици от II тип – Данните от калибровките на трите датчика от II тип и калибрационните уравнения са представени на фигура 5.



Фиг. 5. а) Експериментални данни от калибровката на трите датчика; б) калибровъчни уравнения, получени след обработка на данните

По аналогичен начин на описания по-горе за датчика от I тип, експерименталните данни са коригирани и калибрационните уравнения за всеки датчик и за всеки участък от характеристиките са получени. Програмата за управление на оранжерийното устройство използва калибрационните уравнение за изчисляване на обемната влажност на субстрата  $\Theta$ .

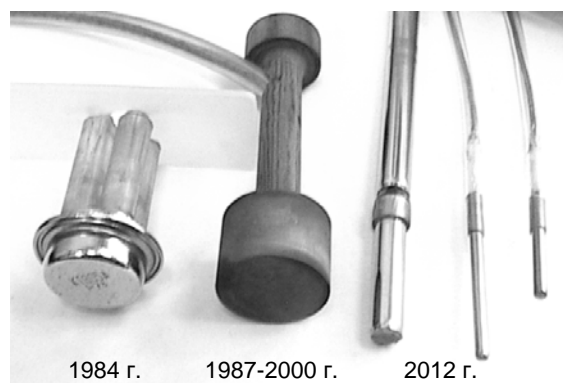
### Заклучение

Проектирани са два прототипа на топлинно-импулсни датчици за измерване на влажност на субстрати за отглеждане на растения в микрогравитация. Изпълнени са калибрационни процедури в 3 типа субстрати – индустриален пясък, „Турфейс“ и „Балканин“. Данните са обработени и са получени калибрационни уравнения на всеки датчик.

Определени са източниците на грешки за всеки активен възел от сондите. Някои от тях са посочени по-долу:

- Стабилността на топлинния импулс по време и амплитуда, напр.  $P = 1,261 \pm 0,00078 \text{ W}$  ;

- Точността на предварителна калибровка на датчиците на температура;
  - Аналогово-цифров преобразувател с дискретизация по-добра от 0,3 mV за диапазон 0-5 V;
  - Периодът на отчитане на температурата – по-малък от 200 ms;
  - Скоростта на температурните изменения на субстратната среда – по-малка от 1°C/h;
- Отчетени са максимални грешки  $\pm 3,8\%$  за датчик от I тип и  $\pm 4,3\%$  за датчик от II тип, при калибриране в максимално допустимата едра фракция на субстрата за II тип – 1,0-1,5 mm.
- Определянето на сумарните грешки изисква натрупване на допълнителни статистически данни за влиянието на техническите параметри на датчиците върху точността на измерване.
- На фигура 6 е показано хронологичното развитие на топлинно-импулсните датчици за влажност на почви за космически цели, проектирани и изработени в ИКИТ-БАН, София.



Фиг. 6. Развитие на датчиците за измерване на влажност на изкуствени почви, проектирани в ИКИТ-БАН, и предназначени за ползване в микрогравитация

#### Литература:

1. Livingston, N.J., G.C. Topp, Soil Water Potential, Chapter 71, In: Soil Sampling and Methods of Analysis, Second Edition, Edited by M. R. Carter E. G. Gregorich, by Taylor & Francis Group, 2006.
2. Ivanova, T.N., P.T. Kostov, S.M. Sapunova, H.S. Dobrev, I.W. Dandolov, Sensors and Methods for Measurement of the Environment parameters in "SVET" Space Greenhouse, Compt. rend. Acad. Bulg. Sci. (ISSN 0861-1431), 45, 11, pp. 55-58, 1992.
3. Yendler, B.S., G.B. Bingham, S.B. Jones and I. Podolsky, Moisture sensor for use in microgravity, SAE Technical Paper no. 951471, 1995.
4. Blackwell, J.H., A Transient-Flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulating Materials in Bulk, Part I – Theory," J. of Applied Phys., Vol. 25, No 2, pp. 137-144, 1954.
5. de Vries, D. A. and Peck, A., On the Cylindrical Probe Method of Measuring Thermal Conductivity with Special Reference to Soils, Aust. J. Phys., 11, pp. 255–270, 1958.