

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА КАПИЛЯРНОТО ИЗДИГАНЕ НА ВОДА В ИЗКУСТВЕНИ ПОЧВИ С ПОМОЩТА НА НИСКОЧЕСТОТЕН КАПАЦИТИВЕН ДАТЧИК

Пламен Костов

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

**Ключови думи:** *капацитивен датчик, съпротивителен датчик, космически експеримент „Субстрат“, въздушно-сух зеолитен субстрат „Балканин“, капилярно издигане на вода.*

**Резюме:** *В космическите оранжерии се използват заместители на природните почви – субстрати. Данни за капилярно издигане на вода, впръскана във въздушно-сух субстратен обем в условия на микрогравитация бяха събрани по време на космически експеримент „Субстрат“. Космонавтът отчиташе визуално динамиката на процеса. При друго изследване беше използвана фотокамера за регистриране на водния фронт. За да се повиши точността при определяне на височината на фронта беше проектиран капацитивен датчик за регистриране на капилярната вода. Резултатите показват, че датчикът регистрира по-високи показания до 11 mm от заснетите с фотокамерата. Допълнителен експеримент с 8-иглен съпротивителен датчик потвърди хипотезата, че част от микрокапилярите на субстрата издигат водата по-бързо и невидимо от останалите. Докладвани са техническите данни на двата нови датчика и са представени резултатите от лабораторните експерименти.*

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE CAPILLARY RISE OF WATER IN ARTIFICIAL SOILS BY LOW-FREQUENCY CAPACITANCE PROBE TECHNIQUE

Plamen Kostov

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

**Key words:** *capacitive sensor, resistive sensors, „Substrate“ space experiment, „Balkanine“ air-dry zeolite substrate, capillary rise of water.*

**Abstract:** *Root substrates as substitutes for the natural soils in space greenhouses are commonly used. Data on capillary rise of water sprayed in air-dry substrate volume in microgravity were collected during the „Substrate“ space experiment. The process dynamics was registered by the astronauts visually. In another study photo-camera was used to record the capillary front. To improve the accuracy in determining the height of the front capacitive sensor for capillary water registration was designed. The results show that the sensor registers higher levels up to 11 mm in comparison with camera-captured levels. Additional experiment with 8-pin resistive sensor confirms the hypothesis that a part of the micro-capillary water rises faster and invisible than visible waterfront. Technical data of the two new sensors and the results of laboratory experiments are reported.*

### Въведение

Субстратът е важна част от космическата оранжерия (КО). Способността на субстрата да доставя вода и хранителни вещества на корените по капилярен път е първостепенен фактор при неговия избор. За определяне на хидродинамичните свойства на кандидатите за космически субстрати се провеждат експерименти на Земята (1-g) и в безтегловност (0-g).

На орбиталната станция (ОС) „Салют-7“ и в Института по медико-биологични проблеми (ИМБП), Москва, бяха проведени два експеримента „Субстрат“ за изучаване на субстрат „Балканин“. Резултатите са публикувани в [1]. Космонавтът наблюдава движението на водния фронт и записва данните за височина и време в бордовия дневник. Периодично, относително

равномерно по време (28 часа), космонавтът е отчитал височината на фронта. Запис на данните от експеримента в ИМБП е правен в рамките на работния ден. Може да се отбележи малкият брой (5-8) на регистрираните нива за всеки експеримент.

Данни от по-късни лабораторни изследвания на капиларни явления в субстрат „Балканин“, регистрирани с помощта на фотокамери, са докладвани от Костов в [2]. Основен проблем и при двата метода (визуален и фото регистрация) обаче остава незадоволителната точност при определяне на текущата средна височина на водния фронт [2].

Автоматизирането на процеса на регистрация ще освободи екипажа (лаборанта) от продължително обслужване на експеримента. Използването на други методи и средства за достоверна регистрация на водните нива трябва да реши проблема с точността на измерването. Цел на дискутирания проект е създаването на датчик за изследване на капиларни свойства на порести среди, в частност субстрати, за целите на космическото растениевъдство.

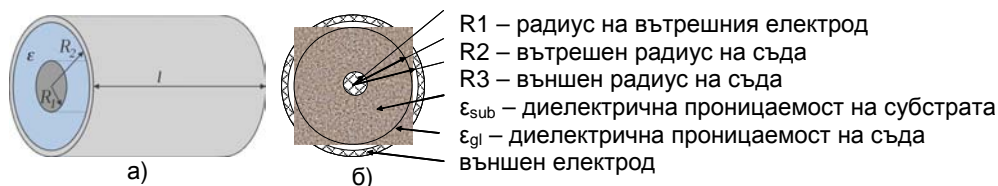
## Методи и материали

### ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

Методите, които се използват за отчет и регистрация на описаните по-горе явления са:

1. визуален отчет и текущо фото-заснемане; 2. електронни методи – а) „точкови“ – съпротивителни, капацитивни, топлинни; б) обемни – капацитивни нивомери.

Експериментът „Субстрат“ в микрогравитация показва, че формата на водния фронт в използваните правоъгълни съдове е куполообразна. За целите на настоящото изследване е използвана цилиндрична боросиликатна Бехерова чаша 400 ml. Върху външната стена на съда е нанесено електропроводимо покритие, служещо за външен електрод. По оста в съда е поставен тънък цилиндричен електрод. В съда е насипан изследвания субстрат. Описаните детайли образуват цилиндричен кондензатор с два диелектрика – субстрата и стената на чашата. Основните зависимости за капацитета на цилиндричен кондензатор (цилиндрична чаша с централен и външен електроди) са разгледани в електротехническата литература [3].



Фиг. 1. а) Цилиндричен кондензатор; и б) цилиндричен кондензатор с два диелектрика.

Капацитетът на цилиндричен кондензатор (фигура 1.а) се определя с уравнение (1) –

$$(1) \quad C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(R_2/R_1)}, \text{ където } \epsilon = \epsilon_0\epsilon_r, \text{ и}$$

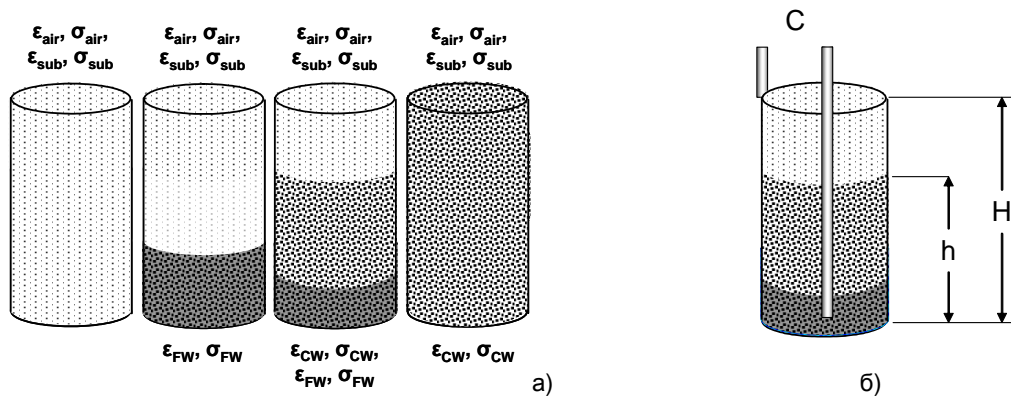
където:  $\epsilon_0$  – диелектрична проницаемост на вакуума,  $\epsilon_r$  – относителна диелектрична проницаемост на диелектрика;  $l$  – дължина (височина) на кондензатора.

Когато диелектрият е двупластов (фигура 1.б), капацитетът  $C$  се изчислява –

$$(2) \quad \frac{1}{C} = \frac{\ln(R_2/R_1)}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{sub}l} + \frac{\ln(R_3/R_2)}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{gl}l},$$

където  $\epsilon_{sub}$  – диелектрична проницаемост на субстрата в съда,  $\epsilon_{gl}$  – диелектрична проницаемост на съда (боросиликатно стъкло).

След подаване на първоначалната доза вода, електрическите параметри на съставния диелектрик (субстрат, въздух, вода) се променят динамично. На фигура 2.а. са показани тези промените в четири характерни момента от експеримента. Тук  $\epsilon$ ,  $\sigma$  са диелектрична проницаемост и електрична проводимост на: въздуха –  $\epsilon_{air}$ ,  $\sigma_{air}$ ; субстрата –  $\epsilon_{sub}$ ,  $\sigma_{sub}$ ; свободната вода между частиците –  $\epsilon_{FW}$ ,  $\sigma_{FW}$ ; капиларната вода в частиците на субстрата –  $\epsilon_{CW}$ ,  $\sigma_{CW}$ .



Фиг. 2. а) Фази на вертикалното развитие на процеса „капиллярно издигане на вода в субстрат, след първоначално впръскване на доза вода“ и промените на електрическите параметри на съставния диелектрик (субстрат, въздух, вода); б) пояснителна фигура към изчислението на текущия капацитет  $C$ .

Електрическите параметри на средата (фигура 2.а) са функция на височината  $h$  на капиллярно издигнатата вода (фигура 2.б).

Общият капацитет на датчика  $C$  (фигура 2.б) е сума от няколко капацитета –

$$(3) \quad C = C_{wiring} + \frac{C_{dry} C_{gl}^{dry}}{C_{dry} + C_{gl}^{dry}} + \frac{C_{wet} C_{gl}^{wet}}{C_{wet} + C_{gl}^{wet}},$$

където  $C_{wiring}$  е капацитета на външните проводници, съединяващи датчика с електронния блок, който не е функция на  $h$ ;  $C_{dry}$  – капацитета на горният цилиндричен пласт сух субстрат;  $C_{gl}^{dry}$  – капацитета на частта от стената на стъклената чаша, прилежаща към пласта сух субстрат;  $C_{wet}$  – капацитета на долния цилиндричен пласт влажен субстрат;  $C_{gl}^{wet}$  – капацитета на частта от стената на стъклената чаша, прилежаща към пласта влажен субстрат.

Капацитетът на сухия субстрат  $C_{dry}$  се изчислява с уравнение (4) –

$$(4) \quad C_{dry} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{dry} \cdot (H - h)}{\ln(R_2 / R_1)}$$

Капацитетът на влажния субстрат  $C_{wet}$  се изчислява с уравнение (5) –

$$(5) \quad C_{wet} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{wet} h}{\ln(R_2 / R_1)}$$

Капацитетът на стъкления кондензатор се определя от геометричните размери и диелектричната проникваемост на съда, показани на фигура 1.

$$(7) \quad C_{gl} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{gl}}{\ln(R_3 / R_2)}$$

Текущият капацитет на субстрата в съда е зависим от височината на омокряне  $h$  и се определя от сумата на двата капацитета, определени с (4) и (5) –

$$(6) \quad C_{sub} = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln(R_2 / R_1)} \cdot \left[ \epsilon_{dry} \left( 1 - \frac{h}{H} \right) + \epsilon_{wet} \frac{h}{H} \right]$$

В случай, че  $\epsilon_{dry} \ll \epsilon_{wet}$ ,  $\epsilon_{air} \ll \epsilon_{wet}$  и  $h > 0$ , както и електрическата проводимост на влажния субстрат  $\sigma_{wet} \gg \sigma_{air}$ ,  $\sigma_{dry}$ , капацитетът на датчика е линейна функция на издигания се воден фронт –

$$(8) \quad C = \frac{I}{\frac{\ln(R_2/R_1)}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{wet}} + \frac{\ln(R_3/R_2)}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{gl}}} \cdot h$$

Уравнение (8) показва, че капацитетът на датчика  $C$  се определя основно от диелектричната проникваемост на стената на съда  $\epsilon_{gl}$  и текущата височина  $h$  на мокрия субстрат, който е в контакт със стената.

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАНОВКА

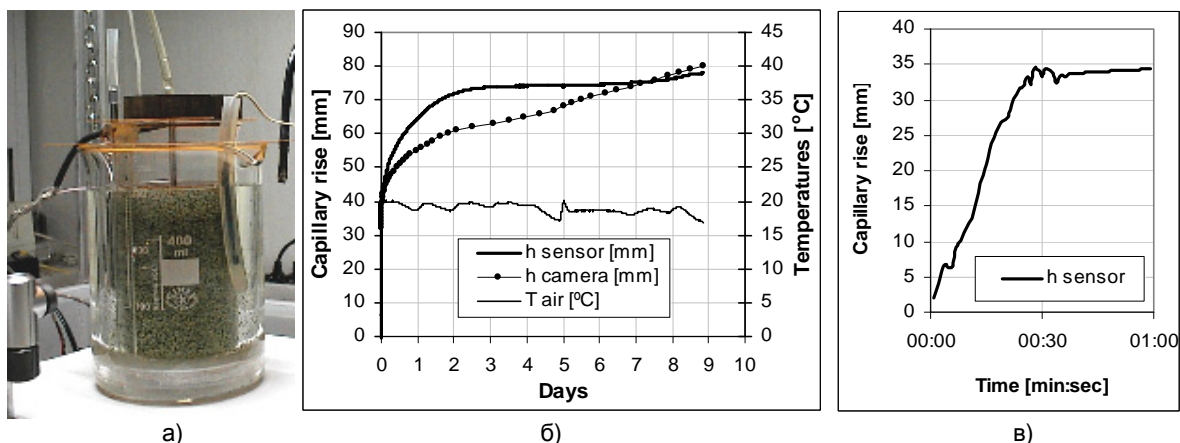
Направена е проверка на условията към уравнение (8) като са измерени електрическите параметри  $C$  [F],  $R$  [ $\Omega$ ] на избрания съд, алуминиеви електроди и субстрат „Балканин“ 1,5-2,0 mm при честота 1 kHz. Резултатите са следните: диелектрик въздух:  $C=3,5 \cdot 10^{-12}$  F,  $R=\infty$ ; диелектрик сух субстрат:  $C=60,3 \cdot 10^{-12}$  F,  $R=2,55 \cdot 10^6 \Omega$ ; диелектрик влажен субстрат:  $C=628 \cdot 10^{-9}$  F,  $R=264 \Omega$ ; капацитет на датчика с влажен субстрат:  $C_{sensor}=481,10^{-12}$  F; съпротивление на датчика с влажен субстрат:  $R_{sensor}=10^4 \Omega$ . Следователно, условията са изпълнени.

За да се осигури едновременно регистриране на текущото ниво на капиллярно издигащата се вода от датчика и чрез фотографиране на явлениято, в ролята на външен електрод на датчика е използван електролитен разтвор на NaCl. За целта, основният съд на датчика е поставен в друг прозрачен съд, а между двата съда е налят електролита.

В близост до датчика е разположен електронен преобразувател „капацитет – електричен сигнал“. Преобразуването на капацитета  $C$  в импулси с постоянна честота и управляем коефициент на запълване (D.C.) е предпочетено. Основните данни на преобразувателя са: честота на генератора – 4 kHz; изменение на коефициента на запълване (D.C.) – 0,05-0,95; софтуер – съвместим с датчиците за температура SMT160-30, Smartec.

**Калибровка на датчика.** С помощта на набор кондензатори с капацитети от 40÷450 pF, включени във веригата на преобразувателя вместо самия датчик, е снета характеристиката на преобразувателя  $Data=f(C)$ . Калибровката  $h \leftrightarrow Data$  е проведена по два метода: I. В датчика (без субстрат) се подават равни дози солеви разтвор. Регистрират се височината  $h$  и  $Data$ ; II. В датчика със субстрат се подават последователно равни дози дестилирана вода. Регистрират се височината  $h$  и  $Data$ . Полученото калибрационно уравнение е от вида –  $y=0,7009x+15,745$ , където  $y$  височината на капиллярно издигане в милиметри, а  $x$  са данните  $Data$ .

Фотокамера Creative VF0070 снима процеса на капиллярното издигане (фигура 3.а) и от изображенията се извлича информация за височината на водния фронт и за времето за нейното достигане. Тези данни се съпоставят с данните от капацитивния датчик (фигура 3.б).

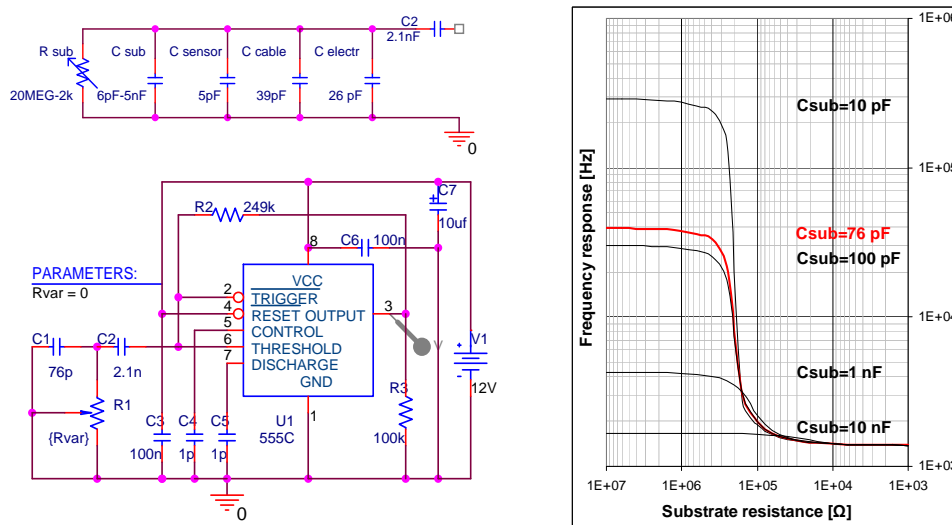


Фиг. 3. Изследване на капиллярното издигане на вода в субстрат „Балканин“: а) Експериментална постановка; б) Резултати: Данни от датчика и от фотокамерата за капиллярното издигане след първоначално подаване на доза вода в дъното на съда до 33-ия милиметър; в) Крива на прехода от началната доза вода към капиллярно издигане (34-та сек).

#### Резултати

Резултатите от проведеното 9-дневно измерване са представени на фигура 3. Поддържаната температура на въздуха в лабораторията е  $18 \pm 2^\circ\text{C}$ . Температурното отклонение от  $\pm 2^\circ\text{C}$  е съпоставимо с нормалната температурна девиация на борда на обитаем космически обект. Съществено се различават обаче регистрираните височини по двата метода след

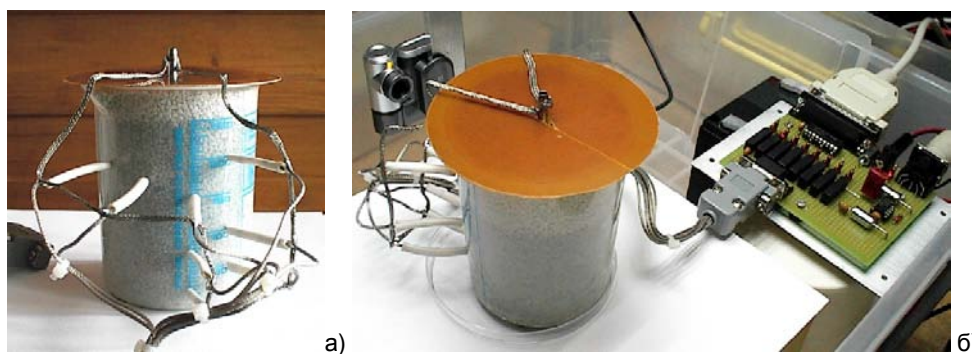
първите часове на измерването. Измерването беше повторено трикратно и същите резултати бяха получени. Беше издигната **хипотеза** – част от микрокапилярите на субстрата издигат водата с по-голяма скорост от останалите, а количеството на тази водата е недостатъчно да промени различимо цвета на овлажнения субстрат. За да се провери тази хипотеза беше проведен допълнителен експеримент с нов датчик, измерващ електрическото съпротивление на субстрата във функция от височината на капилярния фронт.



Фиг. 4. Етапи на проектирането на резистивния датчик и *PSPICE* моделиране на преобразувателя.

На фигура 4 са представени еквивалентна електрическа схема на входната верига на преобразувателя; електрическата схема на преобразувателя на основата на ИС 555 [4] и *PSPICE* моделирането на честотата на преобразуване  $F_{OUT} = f(R_{SUB}, C_{SUB})$ .

Експерименталната постановка е представена на фигура 5. Осем иглени датчика са поставени хоризонтално в субстратния обем (фигура 5.а). Осемканален комутатор (фигура 5.б) превключва иглените датчици последователно и всяко текущо съпротивление на субстрата се преобразува в честота в диапазона 1,2÷38 kHz (фигура 4). Основната задача на тези датчици е да регистрират появата на капилярна вода на нивото на всеки от тях. Направен е фотозапис на капилярното издигане за визуална регистрация и последващо сравнение на данните.

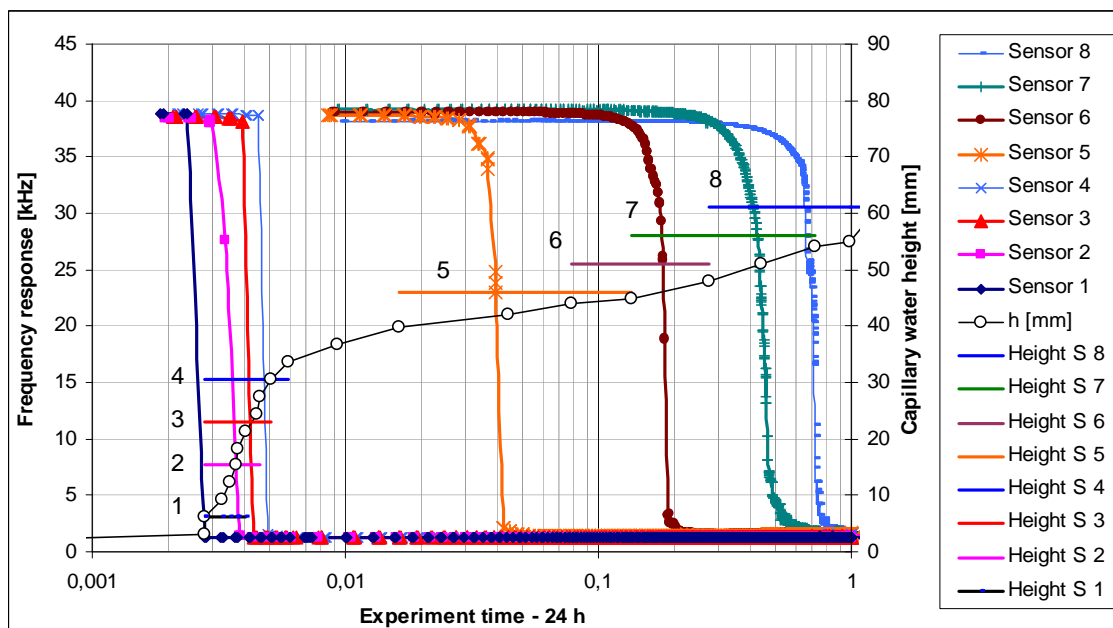


Фиг. 5. Експериментална постановка: а) Измервателна полипропиленова чаша 300 ml, запълнена със въздушно-сух субстрат „Балканин“ и монтирани централен електрод – общ; четири хоризонтални иглени електрода, разположени в областта на капилярната вода; четири електрода са разположени в областта на гравитационната вода; б) фотокамера регистрира капилярното издигане, а съпротивлението на субстрата между всеки иглен електрод и общия централен електрод се преобразува в честота.

### Резултати от допълнителния експеримент

Резултатите от проведеното 24-часово измерване са представени на фигура 6. На графиката са отбелязани височините на иглените датчици относно дъното на съда с хоризонтални отсечки *Height S1-S8*, [mm], кривата на капилярно издигане *h* [mm], заснета от фотокамерата, и честотните данни от датчиците *Sensor 1-8*, [kHz]. Пресечната точка на височината на всеки датчик с кривата *h(t)* дава времето за реакция на датчика (по оста X), в случай, че реалният капилярен фронт е този, записан от фотокамерата. След началото на

капиллярното издигане на водата ( $h > 31 \text{ mm}$ ), всеки датчик от № 5 до № 8 последователно регистрира наличие на капилярна вода **преди** фронтът на видимата капилярна вода, заснет от фотокамерата, да достигне датчика. Например, *Sensor 5* реагира за наличие на вода около 50-тата минута, докато визуално регистрираното съвпадение е в 230-тата минута.



Фиг. 6. Данните от 8 броя датчици *Sensor 1-8*, отчитащи промяната на електрическото съпротивление на субстрата по време на издигане на капилярната вода, са съпоставени с данните от фотокамерата *h*.

Получените данни от съпротивителните датчици потвърждават хипотезата, че част от капиллярите на микропорите издигат водата по-бързо от видимия воден фронт. Количеството на тези пори вероятно е недостатъчно да издигне достатъчно капилярна вода, която да промени цвета на субстрата различимо.

### Заклучение

Проектиран е кондензаторен датчик за регистриране на динамиката на капиллярно издигане на вода в субстрат, отговарящ на изискванията за работа в микрогравитация.

Измерванията с него показваха, че данните от датчика и от фото регистратора на капиллярното издигане се различават с до 11 mm. Издигната и потвърдена беше хипотеза, че по-големите по диаметър капилляри на микропорите издигат водата по-бързо и невидимо, което не е наблюдавано досега. Хипотезата беше потвърдена с мрежа от 8 резистивни датчици.

С помощта на новия датчик могат да се регистрират детайлно всички фази на процеса. Например, моментът на преминаване на водата от първоначално впръскване в капиллярно издигане (34,6-та сек.), показан на фигура 4.а, не може да бъде регистриран с фотокамера.

### Литература

1. Ivanova, T., P. Kostov, Prospects for the Use of the Higher Plants in Space Flight – Experiment „Substrat“, 37th IAF Congress, Innsbruck, Austria, October 4-11 Oct., 1986, Rep. IAF/IAA-86-374.
2. Kostov, P., Capillary Movement Of Water In Air-Dry Zeolite Substrate: Analysis Of The Results From Space And Laboratory Experiments, SES 2011, Seventh Scientific Conference with International Participation, Space, Ecology, Safety, 29.11–01.12. 2011, Sofia, Bulgaria, p. 191.
3. Fraden, J., Handbook of Modern Sensors, © 2004, 1996 Springer-Verlag New York, Inc., ISBN 0-387-00750-4.
4. Traister, Robert J., Book, The 555 IC project book, McGraw-Hill/TAB Electronics, March 1985.