

## ОСОБЕНОСТИ И ПРИЛОЖЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОННИ ТЕНЗИОМЕТРИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА НАЛЯГАНЕ В СИСТЕМИТЕ ЗА НАПОЯВАНЕ НА РАСТЕНИЯТА

**Пламен Костов, Константин Методиев**

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

**Ключови думи:** субстрат „Балканин“, тензиометричен датчик, електронен преобразувател на налягане, дозатор на вода.

**Резюме:** Разгледани са особеностите на субстратите, създадени за работа в микрогравитация, и особеностите на тензиометричните датчици при дълговременна работа. Предположено е, че при работа с високо съдържание на вода в субстрата (ППВ и по-високо) може да се използва пореста керамична чаша за тензиометъра с диаметър на порите около 100  $\mu\text{m}$ , която може да осигури непрекъсващо измерване на матричния потенциал до няколко kPa при дълговременни експерименти. За проверка на хипотезата бяха проектирани и калибрирани топлинно-импулсен датчик за водно съдържание и тензиометричен датчик за матричен потенциал на субстрат „Балканин“. С помощта на двата датчика беше снета работната част от Основната хидрофизична характеристика (ОХФХ) на субстрата. Проектиран и калибриран беше дозатор на вода за програмно напояване на субстрати в лабораторни условия на основата на електронен датчик за налягане.

## PECULIARITIES AND USE OF ELECTRONIC TENSIO METERS AND PRESSURE TRANSDUCERS IN THE PLANT IRRIGATION SYSTEMS

**Plamen Kostov, Konstantin Metodiev**

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

**Key words:** *Balkanine substrate, tensiometer, electronic pressure transducer, water-dosing device.*

**Abstract:** *The peculiarities of the substrate characteristics, designed for microgravity application, and the tensiometers are discussed. It has been suggested that when working with high substrate water content (FC and higher), the porous ceramic cup with pore diameter of about 100  $\mu\text{m}$  for long-term measurement of matrix potential can be used. To test the hypothesis a heat-pulse sensor for water content and tensiometer for matrix potential measurements were designed and calibrated. The working range of the Retention Curve (RC) of Balkanine substrate was measured by both sensors. A programmable water-dosing device for automated irrigation in laboratory plant root module using an electronic pressure sensor was designed and calibrated.*

### **Въведение**

*Особености на субстратите в сравнение с почвите*

Естествените почви имат плавна ОХФХ в областта на достъпната вода за растенията. Оптималната влажност за растеж е  $0,2 \pm 0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Изкуствено произведена почва на основата на порести материали е прието да се нарича *субстрат*. При физико-математическото моделиране на субстрата се използва термина *матрица*. Субстратите обикновено имат двойна порестост – макропори между частиците и микропори във всяка частица. Беше установено, че в микрогравитация оптималната влажност на субстрата е в интервала  $0,3 \pm 0,35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  [1]. Както за обикновените почви, така и за субстратите, основната взаимовръзка между водния потенциал и водното съдържание се дава от ОХФХ. Тя се определя с помощта на два датчика – за матричен потенциал и за водно съдържание, които измерват едновременно при изменение на водното съдържание от насищане до въздушно-сух субстрат.

### Особености на тензиометъра при дълговременна работа

Общият вид на тензиометъра и принципът на работа са разгледани широко в литературата, например в [2]. Матричният потенциал  $\Psi_M$  на водата в субстрата се измерва с тензиометър и се изчислява от показанията на измерителния манометър и от вертикалното разстояние между манометъра и порестата чаша на тензиометъра:

$$(1) \quad \Psi_M = \Psi_{gauge} - (z_{gauge} - z_{cup}) < 0$$

Когато субстратът изсъхва, матричният потенциал се увеличава и налягането в тензиометъра достига до  $-(50 \div 100)$  и повече  $kPa$ . Това отрицателно налягане се превръща в естествен стимулатор на газообазуване в херметизираното тяло на уреда. Разтвореният във водата въздух и образуващите се водни пари заемат все по-голям обем и при достатъчно количество газ водната връзка се прекъсва необратимо. Когато тензиометърът се използва в Земни условия, въздушните мехурчета се събират в най-високата част на датчика. През няколко дни тензиометърът се обезвъздушавя, в него се долива вода и отново се херметизира. В условия на микрогравитация образуващите се въздушни мехурчета плуват свободно във водата и не могат да бъдат отстранени. Така появата на погрешни показания на уреда не може да бъде предвидена, а самата процедура по периодичното презареждане с дегазирана вода е сложна и не гарантира повтаряемост на калибровката.

### Особености на лабораторните системи за напояване

Предмет на разглеждането е системата за напояване, използвана в оранжерия „Свет“. Основните възли, които тя съдържа са резервоар с вода, водна помпа и клапани. Водната доза се регулира чрез продължителността на работа на водната помпа ( $0,5 \div 10$  s при дебит  $15 \div 20$  ml/s). Установено е, че хидравличното съпротивление на водопроводната система се променя  $2 \div 3$  пъти по време на вегетация, което променя водната доза. Данните от датчика за влажност не могат да се привържат към реално подадените количества вода само по данните за броя на подадените дози, поради променящото се количество вода в дозите.

Дългогодишните наблюдения върху работата на водната помпа в микрогравитация и в лабораторията показаха, че този електромеханичен възел има кратък работен ресурс, притежава нестабилност при дозирането на малки количества вода и той периодично се подменя. Привързването на биологичния статус на растенията към текущото количество вода в кореновата зона изисква повишаване на точността на задаване и измерване на водната доза.

За да се решат разгледаните проблеми е необходимо да бъдат проектирани датчик и изпълнителен механизъм: (1) тензиометър за дълговременно измерване на матричния потенциал на субстрата; и (2) управляем дозатор на вода за лабораторния макет „Свет-3“.

Проектът има следните: *Цел:* Да се изследват възможностите за използване на тензиометрични датчици в субстратни среди за дълговременни експерименти с растения; *Задачи:* (1) - Да се проектира прототип на датчик за матричен потенциал на субстрати; и (2) - Да се проектира точен дозатор на вода; и *Предмет на изследването:* Водния статус на субстрат „Балканин“ при използването на програмируем дозатор за напоителната система, управляван от тензиометър.

Планирано е да бъдат извършени следните дейности:

1. Проектиране на датчик за измерване на водното съдържание в субстрата, работещ на основата на топлинно-импулсна техника.
2. Проектиране на тензиометричен датчик за измерване на матричен потенциал с подобрени експлоатационни характеристики.
3. Снемане на ОХФХ на субстрат „Балканин“ с двата датчика.
4. Проектиране на дозатор за вода, използващ електронен датчик за налягане.

### Методи и материали

#### Метод за измерване на водното съдържание в субстрата

Теоретичните основи на топлинно-импулсните датчици, разработвани в лабораторията, са разгледани в [3]. За проектирането на датчик, предназначен за настоящото изследване, е използвано уравнението:

$$(2) \quad K = \frac{P}{4\pi \cdot (\Delta T = const)} \cdot \ln(t)$$

където:  $K$  [W/(°C.m)] е топлинната проводимост на субстрата;  $P$  [W/m] е линейната топлинна (електрическа) мощност на нагревателя;  $\Delta T$  [°C] е нарастването на температурата на сондата след време  $t$ ;  $t$  [s] е времетраенето на топлинния импулс.

В обема на субстрата се подава топлинен импулс с мощност  $P$  за достигане на постоянна температурна разлика  $\Delta T$  между крайната и началната температури на сондата, измерва се продължителността на топлинния импулс  $\Delta t$ , която е пропорционална на топлинната проводимост на средата, а топлинната проводимост е пропорционална на влажността на субстрата.

#### *Метод за измерване на матричния потенциал на водата в субстрата*

Горната граница на диапазона на измерване при тензиометрите се определя от пределното налягане на въздушните мехурчета  $h_b$  (известно също като „air entry value“) върху порестата керамична мембрана между субстрата и обема на тензиометъра:

$$(3) \quad h_b = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{\rho \cdot g \cdot r_{eff}}$$

където:  $\sigma$  е повърхностното напрежение между течната и газовата фази (чиста вода при 25°C  $\sigma=0,072$  N/m),  $\alpha$  е контактния ъгъл между течността и материала на чашата ( $\sim 0^\circ$ ),  $\rho$  е плътността на чистата вода ( $10^3$  kg/m<sup>3</sup>),  $g$  е гравитационната константа ( $9,780-9,832$  m/s<sup>2</sup>).

Тензиометричните керамични чаши обикновено имат пори с диаметър  $1-5 \mu m$ , които осигуряват измерване на налягане до  $-85$  kPa при периодично сервисно обслужване. Предположението е, че при диаметър на порите  $100-150 \mu m$ , тензиометърът може да измерва воден потенциал до няколко kPa без сервисно обслужване през целия период на вегетацията.

#### *Метод за измерване на водната доза за поливане*

За определяне на водната доза, предназначена за впръскване в зоната на корените на растенията, е избран метода на измерване на хидростатичното налягане на водата  $P$  в съд с обем  $V$  и височина  $h$ . Като се приеме, че водата е несвиваема и височината  $h$  е много по-малка от радиуса на Земята, хидростатичното налягане  $P$  се определя от формулата:

$$(4) \quad P = \frac{mg}{A} = \frac{\rho Vg}{A} = \frac{\rho Ahg}{A} = \rho gh$$

където:  $\rho$  е плътността на водата [kg/m<sup>3</sup>];  $g$  е гравитационното ускорение, [m/s<sup>2</sup>],  $A$  е площта на водния стълб [m<sup>2</sup>],  $h$  е височината на водния стълб, успореден на посоката на ускорението [m].

Хидростатичното налягане  $P$  е функция само на височината на водния стълб  $h$ , а водният обем  $V$  в резервоара, във функция от  $h$ , се определя от израза:

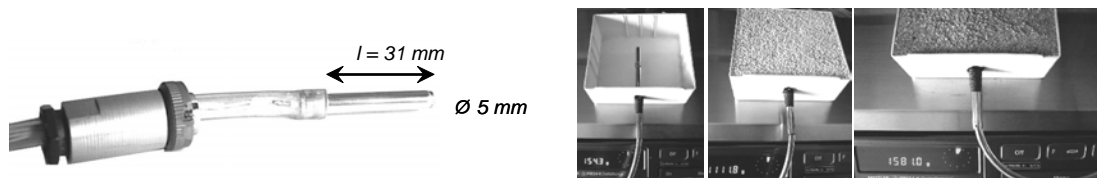
$$(5) \quad V(h) = K_{form}(h) \cdot A \cdot h = K_{form}(h) \cdot P(h)$$

където:  $V(h)$  е обема на съда във функция от височината на водния стълб;  $K_{form}(h)$  е коефициент на формата на съда;  $h$  е височината на водния стълб;  $P(h)$  е хидростатичното налягане във функция от височината на водния стълб. В случай, че съдът е цилиндричен,  $K_{form}(h) = 1$ .

#### *Датчик за водно съдържание от тип $\Theta = f(\Delta t)$ при $\Delta T = const$ .*

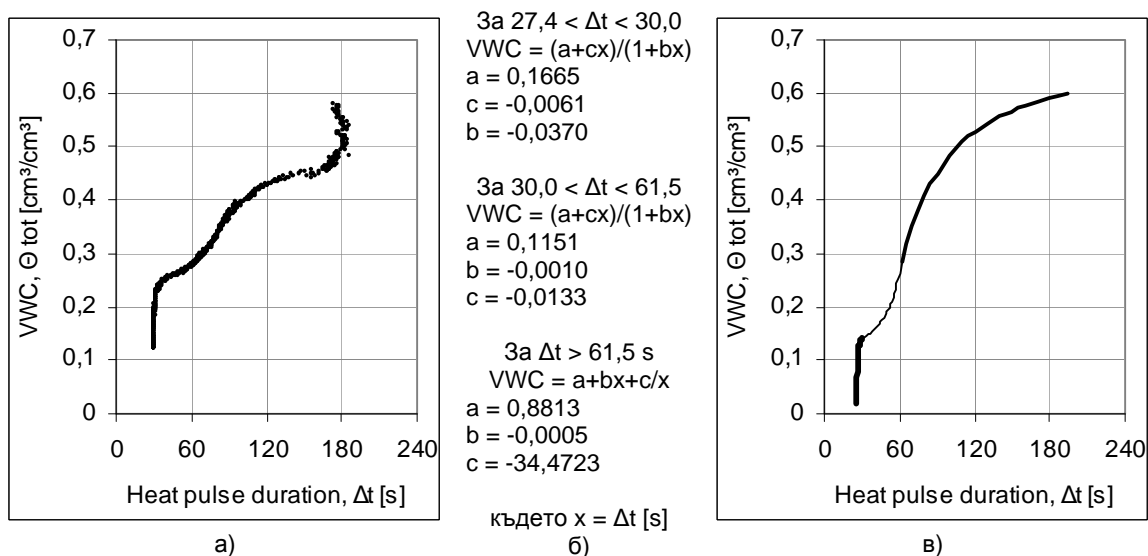
На фигура 1 са показани външният вид на датчика и техническите условия за калибриране. Основните характеристики на проектирания датчик са:

- Дължина на активната част – 31 mm;
- Диаметър на активната част – 5 mm;
- Нагревателен елемент – резистор 100  $\Omega$ , 0,1%, 1 W, 50 ppm/°C;
- Захранване на нагревателя –  $I = 0,10$  A stab.;
- Температурен датчик – DS18B20, MAXIM, 12 bit 1-Wire Digital Thermometer;
- Устойчивост – херметизиран, антикорозионно покритие;
- Софтуер – управлява нагревателя, измерва  $T$ ,  $t$ , изчислява  $\Theta$ ;



Фигура 1. Външен вид и размери на датчика за обемна влажност на субстрата и лабораторните измервания на текущата маса на изсъхващия субстрат по време на калибровъчната процедура

Калибровъчната процедура на датчика включва съд с размери  $D \times Ш \times В$   $134 \times 134 \times 56$  mm, в който е насипан и уплътнен субстрат „Балканин“ с фракционен състав  $1,5-2,0$  mm и обемна хигроскопична влажност 7,1%. Добавена е вода до насищане 489,2 ml, а изчислената обемна влажност при насищане е  $\Theta = 0,578$  cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>. Субстратът е оставен да изсъхва свободно от горната повърхност на съда до достигане на равновесна хигроскопична влажност. Резултатите са представени на фигура 2.

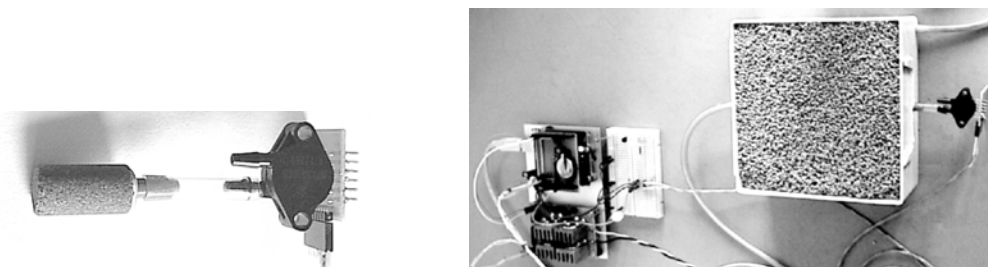


Фигура 2. а) Резултати от двукратно измерване (2 x 24 дни) на продължителността на топлинния импулс на датчика и текущата обемна влажност на субстрата; б) Уравнения на преобразуване на продължителността на топлинния импулс  $\Delta t$  [s] в обемна влажност  $\Theta$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>] за три участъка от характеристиката; в) графичен вид на калибровъчната крива на датчика

Трите уравнения от фигура 2.б. са въведени в програмата за изчисляване на текущата стойност на обемната влажност  $\Theta$  (VWC) [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>] от измереното време  $\Delta t$  [s].

#### Тензиометричен датчик за матричен потенциал

Проектираният тензиометричен датчик е представен на фигура 3.



Фигура 3. Външен вид на тензиометричния датчик за матричен потенциал и експериментална постановка за определяне на ОХФХ на субстрат „Балканин“ (поглед отгоре)

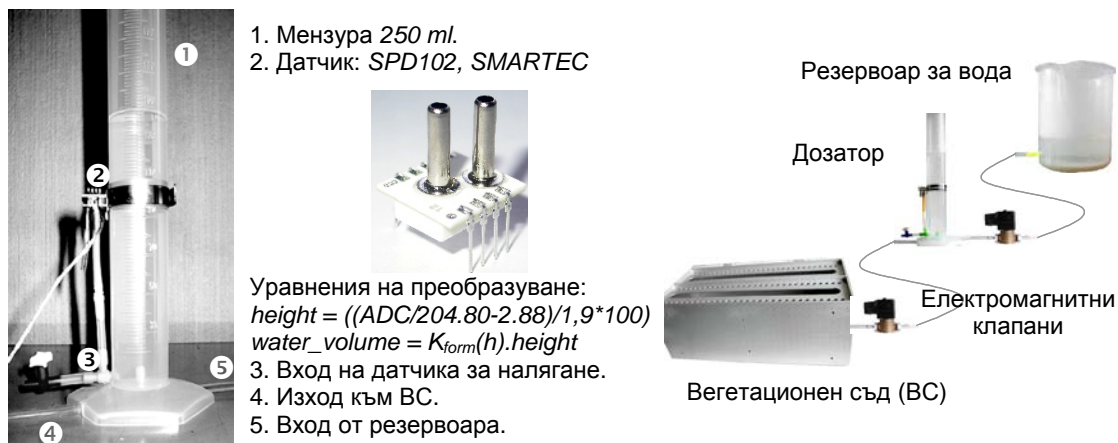
Използвани са следните възли и материали: електронен диференциален преобразувател на налягане – MPX5010 (Freescale Semiconductor), диапазони на измерване –  $\pm 10$  kPa и уравнение на преобразуване  $matrix\_potential = (ADC / 204,80 - 0,184) / 450 * 1000$  [kPa];

тръбопровод; тензиометрична чаша от пореста керамика с диаметър на порите около  $100 \mu\text{m}$  с „air-entry value“ около  $30 \text{ cm}$  воден стълб ( $3 \text{ kPa}$ ).

Обемът на преобразувателя, тръбопроводът и тензиометричната чаша са напълнени с дегазирана дестилирана вода. Датчиците за водно съдържание и за матричен потенциал са монтирани срещуположно и на една височина в обема на субстрата. Вляво е разположен електронен блок, съдържащ микроконтролера и автономно захранване.

#### Дозатор на вода за поливане. Блокова схема

На фигура 4 са представени дозаторът на вода, използващ електронен преобразувател на налягане, опис на използваните елементи и схема на свързване на дозатора.



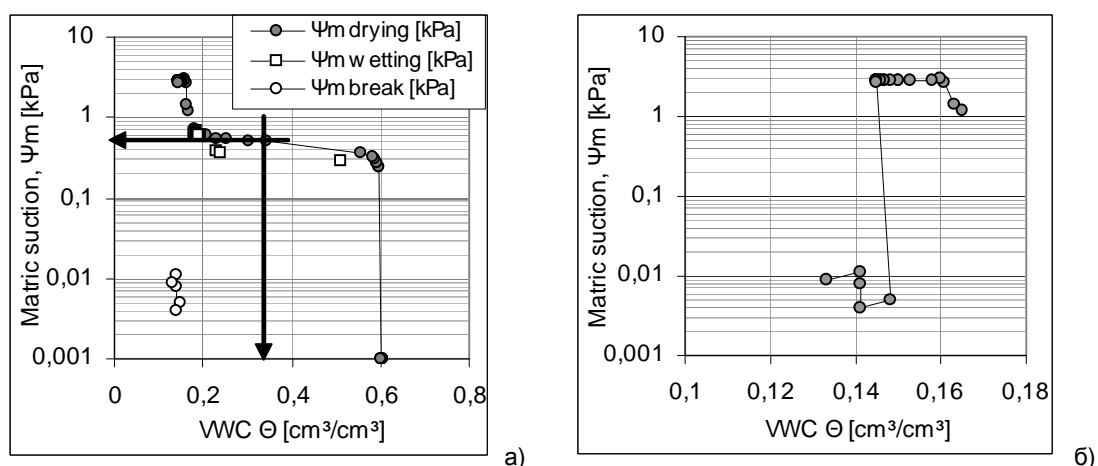
Фигура 4. Дозатор на вода с описание на отделните възли и схема на свързване на дозатора към системата за напояване на кореновия модул ВС на оранжерията

#### Микроконтролерна платформа за събиране на данни и управление

За събиране, обработване и съхранение на данните от датчиците, за управление на изпълнителните механизми и визуализиране на текущите данни е използван микроконтролер тип *Arduino*. Съставена е програма, с помощта на която микроконтролерът може да работи самостоятелно, без връзка с външен компютър.

#### Резултати

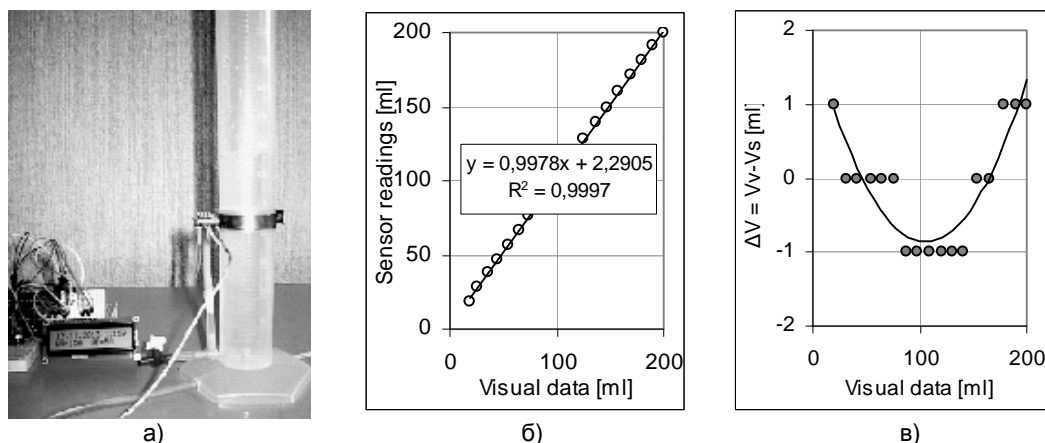
На фигура 5 са представени данните от двата датчика за измерване на водното съдържание  $\Theta$  и на матричния потенциал  $\Psi_m$  на субстрата.



Фигура 5. а) По данните от датчиците за водно съдържание и матричен потенциал е построен работният участък на ОХФХ, на който със стрелки са посочени водното съдържание ППВ ( $\Theta=0,35$ ) и съответстващият воден потенциал  $\Psi=0,5 \text{ kPa}$ ; б) При достигане на матричен потенциал около  $3 \text{ kPa}$ , водната връзка се запазва за 16-20 часа, след което настъпва необратимо прекъсване

Получената ОХФХ описва целия диапазон влажности от насищане до хигроскопична влажност на въздушно-сухия субстрат „Балканин“. Регистриран е хистерезисът в характеристиката при изсушаване и омокряне на субстрата, типично наблюдаван при зеолитите. При достигане на матричния потенциал до около  $3\text{ kPa}$ , който съответства на „air entry value“ на порестата чаша на тензиометъра, сигналът от тензиометъра преминава в насищане за около  $16\div 20$  часа. След това време водната връзка между субстратните пори и порите на керамичната чаша се прекъсва (фигура 5.б).

#### Дозатор на вода: характеристики



Фигура 6. а) Лабораторна постановка за определяне на предавателната характеристика и точността на дозиране; б) Определяне на точността на преобразуване чрез десетократно измерване на диапазона на дозиране; в) Определена е максимална грешка на отчитане  $\pm 1\text{ ml}$

Основните характеристики на дозатора при автоматично запълване на обем  $200\text{ ml}$  и програмирано изпразване чрез различни по обем дози, са следните: 1) Максимално количество вода  $200\pm 1\text{ ml}$ ; 2) Управляеми дози  $(10\div 180)\pm 1\text{ ml}$ ; 4) Автоматично напълване до  $200\pm 1\text{ ml}$ . Отчетената нелинейност на характеристиката от  $\pm 1\%FS$  (фигура 6.в.) е в рамките на каталожната нелинейност на преобразувателя на налягане от  $\pm 2,5\%FS$ . Автоматичното запълване на обема на дозатора става по команда от микроконтролера, който отчита оставащото количество вода в резервоара и количеството вода в зададената доза.

#### Заклучение

Разгледани са особеностите на субстратите, създадени за работа в микрогравитация и особеностите на тензиометричните датчици при дълговременна работа. Изказано е предположение, че при работа с влажност на субстрата около пределната почвена влагоемност може да се използва пореста керамика за чувствителния елемент на тензиометъра с диаметър на порите около  $100\ \mu\text{m}$ . За проверка на хипотезата бяха проектирани и калибрирани датчик за водно съдържание и тензиометър за матричен потенциал на субстрат „Балканин“ за дълговременни експерименти без текущо обслужване. Беше снета работната част на ОХФХ с помощта на двата датчика. Проектиран и калибриран е дозатор на вода за програмно напояване на субстрати в лабораторни условия на основата на електронен датчик за налягане.

#### Литература:

1. Bingham, G. E., S. B. Jones, D. Or, I. G. Podolskiy, M. A. Levinskikh, V. N. Sytchov, T. Ivanova, P. Kostov, S. Sapunova, I. Dandolov, D. B. Bubenheim, and G. Jahns., 1999, Microgravity effects on water supply and substrate properties in porous matrix root support systems. Acta Astronautica, 2000, 47(11): pp. 839-848.
2. Young, M. H., J. B. Sisson, 3.2.2 Tensiometry, chapter in Book: Methods of Soil Analysis, Part 4 - Physical Methods, SSSA Book Series 5.4, 2002.
3. Kostov, P., Heat-Pulse Soil Moisture Probes for Space Plant Growth Systems, SES 2012, Eighth Scientific Conference with International Participation, Space, Ecology, Safety, 4-6. 12. 2012, Sofia, Bulgaria, Proceedings, 2013, p. 250.