

КАПИЛЯРНО ПРИДВИЖВАНЕ НА ВОДА ВЪВ ВЪЗДУШНО-СУХ ЗЕОЛИТЕН СУБСТРАТ „БАЛКАНИН”: АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ КОСМИЧЕСКИ И ЛАБОРАТОРНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ

Пламен Костов

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

Ключови думи: космически експеримент „Субстрат”, орбитална станция „Салют-7”, въздушно-сух зеолитен субстрат „Балканин”, капиллярно придвижване на вода, воден резервоар.

Резюме: Субстрат „Балканин” беше използван като заместител на естествените Земни почви в космическа оранжерия (КО) „Свет”. През 1985 г. беше изучено поведението на вода, впръскана във въздушно-сух субстратен обем в условия на микрогравитация (0-g). Особеност на този субстрат е, че пори с диаметър до 3 μm заемат 2/3 от обема на порите на отделните частици. Това предполага съществено преобладаване на капилярните сили над хидростатичните при издигането на водата в субстратен слой с височина до 0,1 m. Издигнатата е хипотеза, че височините на капиллярно издигнатата вода в субстрата на Земята (1-g) и при 0-g, са равни. Изказано е предположение, че височината на начално впръсканата вода при 1-g непрекъснато намалява под действие на Земната гравитация, докато при 0-g тази вода се просмуква в порите на околните частици, без да променя своята височина. Проведените допълнителни лабораторни изследвания показват, че едновременното регистриране на текущите височини на капиллярно издигнатата вода чрез порите на частиците и на водния резервоар дава информация, с помощта на която може да се предвиди динамиката на капиллярно издигане на водата при 0-g и еднакви други експериментални условия. Докладвани са резултатите от космически, контролен (наземен) и серия лабораторни експерименти.

CAPILLARY MOVEMENT OF WATER IN AIR-DRY BALKANINE ZEOLITE SUBSTRATE: ANALYSIS OF THE RESULTS FROM SPACE AND LABORATORY EXPERIMENTS

Plamen Kostov

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

Key words: „Substrate” space experiment, Salyut-7 orbital station, Balkanine zeolite-based air-dry substrate, capillary water movement, water reservoir.

Abstract: Balkanine zeolite-based substrate was used as a root growth medium in the Svet space greenhouse (SG). The behavior of water injected in air-dry substrate was investigated in 1985 onboard the Salyut-7 orbital station (“Substrate” space experiment). A terrestrial study of the same substrate shows that the 3 microns in diameter pores occupy 2/3 of the pore volume of each particle. That suggests considerable prevalence of the capillary forces over the hydrostatic ones during particle imbibition with water in a substrate layer up to 0,1 m in height. A hypothesis was put forward that the levels of capillary water rise in the substrate on Earth (1-g) and at microgravity (0-g) are equal. It is suggested that the initial level of the injected water at 1-g continuously decreases as a result of gravity, while at 0-g this water soaks in the surrounding particle pores, without changing its height. Followed up examinations show, that the simultaneous recording of the current capillary water level and the water height in the “tank” gives information through which it is possible to predict the dynamics of the capillary water movement at 0-g and the same other experimental conditions. The results from the space and ground-based experiments, as well as from a series of laboratory experiments are reported.

Въведение

Едно изследване на разпространението на вода в пореста среда (субстрат „Балканин“) беше проведено на борда на орбиталната станция „Салют-7“ на 26-27.08.1985 г. Друг експеримент с аналогична апаратура беше проведен в Москва, Русия, на 26-27.09.1985 г. [1].

Основна цел на изследването на хидродинамичните свойства на субстрат „Балканин“ в условия на безтегловност беше да се подбере оптимален фракционен състав на субстрата за използване в космическа оранжерия (КО) „Свет“. Две основни задачи бяха поставени пред този 24-часов експеримент: 1) Изследване на вертикалното и хоризонталното разпространение на вода в четири фракции на субстрат „Балканин“, 2) Определяне на скоростта на придвижване на водния фронт.

За целите на проекта КО „Свет“, Славчев [2] подготвя теоретичен модел на физическите процеси, протичащи в системата въздух-вода-субстрат за условия на безтегловност (0-g), при отсъствие на биологични образци. Моделиране на същите процеси за Земни условия (1-g), обаче, не е правено. Славчев предлага да бъде използвана следната зависимост на капилярното издигане h от времето t -

$$(1) \quad h = \sqrt{\frac{r_e \sigma (\cos \Theta)}{2\eta} t} = \sqrt{Kt}, \text{ където: } K = \frac{r_e \sigma (\cos \Theta)}{2\eta}, \text{ } r_e - \text{ ефективен радиус на}$$

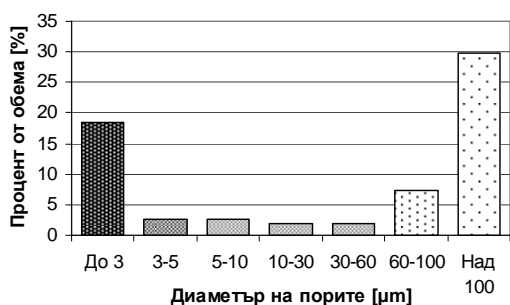
капиляра, σ - повърхностно напрежение на водата, Θ - ъгъл на омокряне, η - динамичен вискозитет на водата.

Когато впръсканата доза вода заеме начален обем с височина h_0 , уравнение (1) придобива вида -

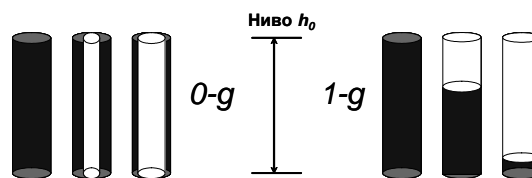
$$(2) \quad (h - h_0)^2 = Kt$$

Захаров [3] определя обемното разпределение на порите в субстрат „Балканин“, в зависимост от техния размер (фигура 1). Порите с диаметър над 60 μm определят обема на порите между частиците (макропори) - около 35-37% от обема на субстрата. Останалото порово пространство 27-30% представлява обема на порите в частиците (микропори), като 2/3 от техния обем е съсредоточен в пори с диаметър до 3 μm . Това означава, че височината, на която може да се издигне вода по капилярен път, е над 10 m, съгласно формулата на Жюрен. Следователно, в субстратен слой с височина 0,1 m преобладаващите сили са капилярните, така както е в безтегловност.

Когато в среда с двойна порестост е впръскано определено количество вода, макропорите на средата служат за резервоар, от който микропорите изтеглят водата и я издигат по капилярен път. На Земята, под действие на Земното ускорение, водата в „резервоара“ непрекъснато намалява своето ниво от h_0 до 0. В микрогравитация водата в макропорите практически не се придвижва по тяхната дължина и вероятно запазва първоначално достигнатата височина h_0 през цялото време на капилярно издигане на водата от микропорите. Плътния стълб вода с височина h_0 постепенно се попива от микропорите на околните стени на макропората, водата в резервоара намалява, но височината h_0 остава относително постоянна (фигура 2). Текущата височина $h_0(t)$ на водното ниво в резервоара е тази, от което би трябвало да се отчита височината на капилярно издигане h и в двата случая.



Фиг. 1. Обемно разпределение на порите на субстрата в зависимост от техния диаметър



Фиг. 2. Поведение на водата, запълнила макропорите на субстрата след началното впръскане на вода до височина h_0

Тези особености, илюстрирани на фигури 1 и 2, дават основание да се издигне хипотеза, че фронтът на капилярната вода в субстрат „Балканин“ трябва да се издигне на една и съща височина над текущото ниво h_0 на впръсканата вода в безтегловност и на Земята.

Цел на представеното изследване е да се провери издигнатата хипотеза чрез допълнителни лабораторни експерименти. Изследването е проведено съгласно техническите условия на експеримент „Субстрат“.

Задачи на изследването са: 1) Да се подготви математически апарат, описващ процесите на начално омокряне на пореста среда за условията на 0-g и 1-g; 2) Да се приложат моделите към данните от експеримент „Субстрат“; 3) Да се проведат допълнителни лабораторни експерименти за определяне на поведението на водата в порестата среда.

Предмет на изследването са данните от космическия и контролния експерименти „Субстрат“ (K1, CIII), съдържащи регистрираното придвижване на водния фронт в субстрата във функция от времето [4], както и резултатите от допълнителните експерименти за измерване на капилярното издигане и на гравитационното спадане на водата в макропорите на субстрата.

Методи и материали

За условията на 0-g в настоящото изследване ще бъде използван предложението от Славчев математически апарат, чиито финални формули (1) и (2) са дадени по-горе.

Когато капиллярите се намират в условия 1-g и са вертикално разположени, един удобен за интерпретация израз е предложен от Peiris и Tennakone [5] -

$$(3) \quad l = l_{max} \left[1 - e^{-\left(\frac{l}{l_{max}} - \frac{t}{t_0} \right)} \right], \text{ където: } l_{max} = \frac{2\sigma(\cos \Theta)}{r_e \rho g} \text{ (Жюрен)} \text{ и } t_0 = \frac{16\eta\sigma(\cos \Theta)}{r_e^3 \rho^2 g^2},$$

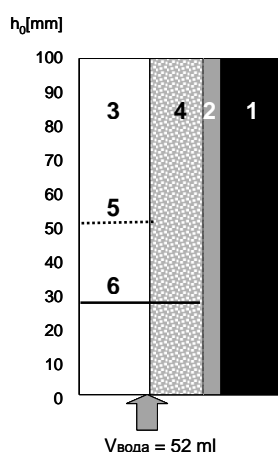
r_e - ефективен радиус на капиляра, σ - повърхностно напрежение на водата, Θ - ъгъл на омокряне, η - динамичен вискозитет на водата, ρ - плътност на водата, g - Земното ускорение.

При по-нататъшното използване на изразите (1), (2) и (3) се приема, че стойностите на параметрите са еднакви при експериментите при 0-g и 1-g.

Резултатите от космическия (0-g) и контролния (1-g) експерименти „Субстрат“ могат да бъдат намерени в [4]. Допълнително космонавтите са записали своите наблюдения за свободно движение на частиците на субстрата във всяка от секциите - най-ронлив е субстратът в CII, по-малко ронлив е в CIV, слабо ронлив е в CI; а в CIII обемът е запълнен плътно. Това ограничава надеждността на данните от експеримента и в това изследване са използвани данните само за секция CIII.

Подготовка на лабораторни експерименти

1. За целите на лабораторните експерименти е използвана цилиндрична мерна чаша с обем 300 ml и размери $\varnothing \times H = 65 \times 90$ mm.
2. Скоростта на впръскване е важен начален параметър, който определя височината на водния резервоар h_0 , от която започва чистото капилярно издигане на водата в субстрата. На фигура 3 е представено определянето на h_0 в зависимост от скоростта на впръскване.



a.

Секция CIII, субстрат „Балканин“ , 2,5÷3,2 mm	
	$V_{\text{общ}} = 300 \text{ cm}^3$
①	$V_{\text{твърда фаза}} = 35\% \cdot V_{\text{общ}} = 105 \text{ cm}^3$
②	$V_{\text{хигроскопична вода}} = 5\% \cdot V_{\text{общ}} = 15 \text{ cm}^3$
	$V_{\text{пори}} = 0,65 \cdot V_{\text{общ}} = 195 \text{ cm}^3$ *
③	$V_{\text{макропори}} = (37-3)\% \cdot V_{\text{общ}} = 102 \text{ cm}^3$
④	$V_{\text{микропори}} = (28-2)\% \cdot V_{\text{общ}} = 78 \text{ cm}^3$
⑤	h_0 (бързо) = $(52/102) \cdot 100 \text{ mm} = 51 \text{ mm}$
⑥	h_0 (бавно) = $(52/180) \cdot 100 \text{ mm} = 29 \text{ mm}$
	h_0 летателен експеримент = 30 mm

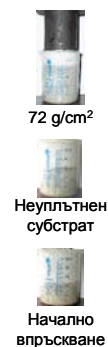
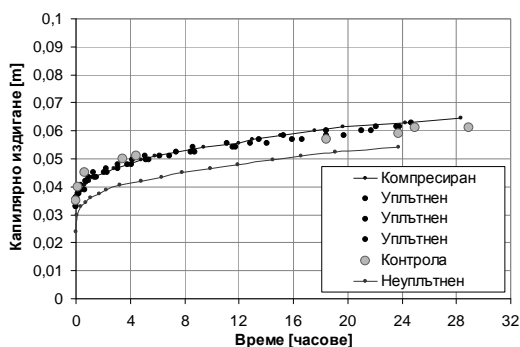
* Съгласно Захаров

b.

Фиг. 3. (а) Обемът на субстрата в CIII е представен в удобен вид за онагледяване на височината h_0 ; б) Изчисления за h_0 при бързо впръскване на вода в секцията (водата заема само макропорите) и бавно впръскване на вода в секцията (водата заема макро- и микропорите)

В резултат на изчисленията е определено, че водата не е впръсквана бързо (теоретически моментално).

3. Определяне на плътността на субстрата, постигната при провеждане на контролния експеримент при 1-g (Фигура 4).



a.

b.

Фиг. 4. (а) Графични резултати от серия експерименти за определяне на влиянието на плътността на субстрата върху капилярното издигане; (б) Височина на водния фронт при начално впръскване на вода h_0 , крайно ниво при неуплътнен субстрат и крайно ниво при допълнителна тежест 72 g/m^2

4. За отчитане на текущата височина на гравитационната вода в макропорите на субстрата е избран метод за отчитане на нивото на водата в прозрачна тръбичка с опитно избран диаметър. Критерий при избора на вътрешния диаметър на тръбичката е равното ниво на свободната вода в макропорите и на водата в тръбичката.

5. Цифров фотоапарат Konica Q-M100 и камера Creative Vf0070 регистрират капилярното издигане и гравитационното спадане на водата във времето.

Лабораторен експеримент 2011 г.

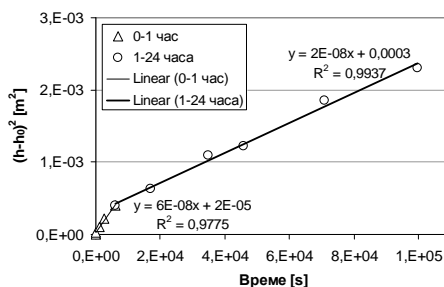
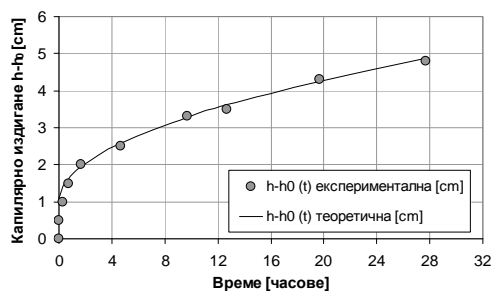
Експерименталната постановка включва: лабораторна чаша, в която е насипан и уплътнен субстрат „Балканин“, фракция 2,5-3,2 mm; капилярна тръбичка, поставена зад мерната линейка на чашата; водоснабдителна система за подаване на вода с коригирано количество от 57 ml за достигане на начално ниво на отчет $h_0 = 35 \text{ mm}$. След подаване на водата в продължение на около 15 s, започва едновременен отчет на нивото на капилярно издигане и на гравитационно спадащото ниво на свободната вода в капилярната тръбичка. Видеокамерата прави покадрови записи на двете нива с подходяща скорост. Общото времетраенето на записите е около 24-28 часа. Всеки записан кадър се обработва за по-голям контраст на изображението и за по-точен отчет на достигнатите нива на водата.

От сметените данни се изчислява текущата разлика между нивото на капилярното издигане и на гравитационното спадане на водата за всяко отчетно време. Тази разлика се добавя към началното ниво h_0 и се построява прогнозната крива на капилярно издигане за 0-g. Получената крива се сравнява с данните за секция CIII на космическия експеримент „Субстрат“.

Резултати

Резултати от експеримент „Субстрат“ (0-g и 1-g) 1985 г.

След прилагане на математическия модел (уравнения 1 и 2) към резултатите от космическия експеримент, е проверена приложимостта на избрания модел, точността на визуалния отчет, направен от космонавтите и е определен коефициентът K (фигура 5) –



a.

b.

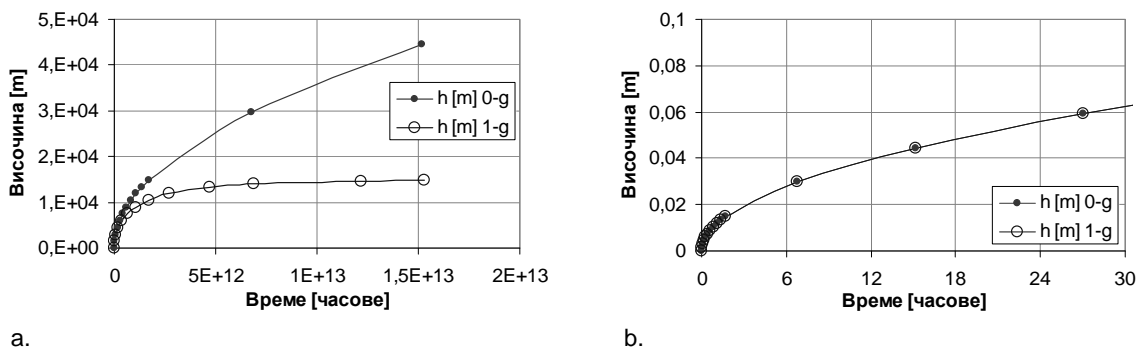
Фиг. 5. (а) Прилагане на модела $h-h_0 = f(t)$ за $K = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ към данните от космическия експеримент от 1985 г.; (б) Проверка на приложимостта на модела $(h-h_0)^2 = K \cdot t$ за същите данни

След прилагане на уравнение (3) към данните от контролния експеримент се констатира, че при равни други параметри (σ , θ , η , ρ , g), еквивалентният радиус на капиллярите е над 1 порядък по-малък от еквивалентния радиус, определен за космическия експеримент.

Резултати от изчисления, съгласно теоретичния модел

С помощта на уравнения (1), (2) и (3) са изчислени и построени кривите на капиллярно издигане на вода в еквивалентен капилляр за 0-g и 1-g и еднакви стойности на параметрите $\sigma=0,0728$ N/m, $\eta=0,001002$ N.s/m², $\cos\theta=1$ и $r_e=10^{-9}$ m. Избраният еквивалентен радиус r_e за тези изчисления е 1-2 порядъка по-голям от определените за горните два експериментални случая, което гарантира приложимост на резултатите при промяна на другите параметри (Фигура 6.а).

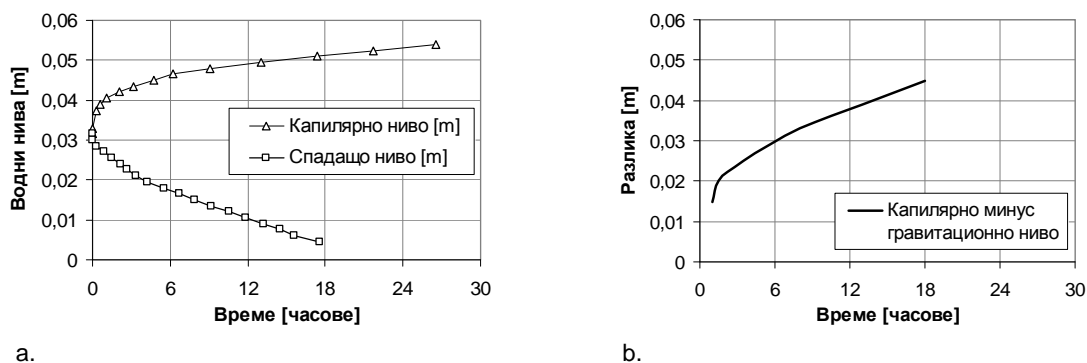
Двете теоретични криви, представени на фигура 6.б, съвпадат напълно при началните условия на експеримент „Субстрат” - височина на субстратния слой до 0,1 m и време до 30 часа. Този резултат показва, че съобщеното в [4] капиллярно издигане при контролния експеримент от 1985 г. вероятно не отговаря на действителното.



а. б. Фиг. 6. Теоретични криви на капиллярно издигане, изчислени с изразите (1), (2) и (3) при параметри: $\sigma=0,0728$ N/m, $\eta=0,001002$ N.s/m², $\cos\theta=1$ и $r_e=10^{-9}$ m; (а) Вид на кривите при неизчерпаем източник на вода и достигане на h_{max} при 1-g; (б) Съвпадение на двете криви за време около 30 часа

Резултати от лабораторните експерименти 2011 г.

Новата функция при това измерване „Спадащо ниво на гравитационната вода във функция от времето” дава информация за текущата промяна на нивото h_0 по време на експеримента. Капилярните сили, които издигат водата в микропорите, трябва да преодоляват и текущото спадане на водата в „резервоара” $[h_0(t)]$ и в резултат, реалното капиллярно издигане представлява сумата между регистрираните височини на капиллярно издигане и гравитационно спадане на водата от началното ниво h_0 . Данните са представени на фигура 7.



а. б. Фиг. 7. (а) Данни от лабораторния експеримент за динамиката на капилярното издигане на водата и на гравитационното спадане на нивото на свободната вода; (б) Крива на реалното капиллярно издигане на водата в субстрата

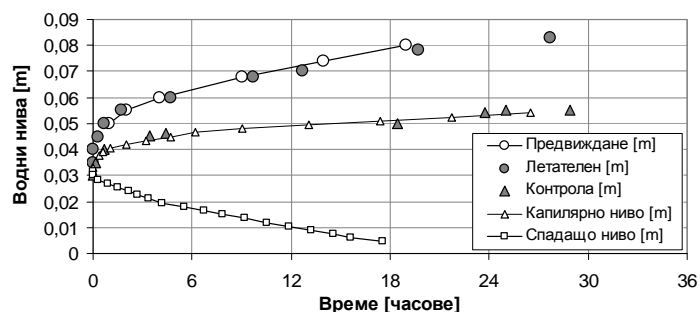
На фигура 8 са представени всички резултати от експерименти през 1985 и 2011 г. Както при оригиналния експеримент „Субстрат”, така и при лабораторния експеримент не е правено повторение на проведените измервания за статистическа достоверност.

Анализ на резултатите

Славчев [2] коментира получените данни от двата експеримента 1985 г. и прави предположения за влиянието на повърхностното напрежение и на ъгъла на омокряне на водата върху зависимостта „дължина на капилярното придвижване на водата h във функция от

времето t' . По-малката височина на капилярното издигане на водата в Земния експеримент, спрямо космическия, е обяснена с влиянието на Земното ускорение.

Докладваните положителни резултати от допълнителните лабораторни експерименти представляват една проверка на издигнатата хипотеза и са стимул за продължаване на това изследване.



Фиг. 8. На една графика са представени резултатите от: космическия експеримент 1985 г. (Летателен), контролния експеримент в Москва 1985 г. (Контрола), лабораторния експеримент 2011 г. (Капиллярно ниво, Спадащо ниво) и прогнозния резултат от 2011 г. за поведението на водата в безтегловност (Предвиждане)

Данните, представени на фигура 8, показват, че след допълнителни проверки на хипотезата, ще може да се предвижда поведението на вода при 0-g в порести среди, подобни на субстрат „Балканин“, само от резултатите от аналогични измервания при 1-g. Такава възможност е достатъчно основание да се продължат изследванията в следните посоки:

1. Математическо описание на едновременните процеси на капиллярно издигане и гравитационно спадане на водата.
2. Допълнителни повторения на лабораторния експеримент с тази фракция за получаване на статистическа достоверност.
3. Използване на по-точни методи и средства за достоверна регистрация на водните нива.
4. Проверка на хипотезата с помощта на данните за друга фракция (1,0-1,5 mm) на субстрат „Балканин“ от експеримент „Субстрат“ или с данни от други експерименти, проведени при 0-g.

Заклучение

Въз основа на резултатите от един космически и Земен експерименти за определяне на динамиката на капиллярно издигане на вода в пореста среда (субстрат „Балканин“) и направените изчисленията с помощта на уравнения (1), (2) и (3) е издигната и проверена хипотеза за преобладаващо влияние на капилярните сили при издигането на вода в микропори с радиус до 1-2 μm и дебелина субстратния слой до 0,1 m. Получените данни и резултати от проведен допълнителен лабораторен експеримент показват добро съвпадение на предвиденото поведение на водата в безтегловност с данните от космическия експеримент „Субстрат“ от 1985 г.

Благодарност

Авторът изказва благодарност на Диана Антонова от ИКСИ-БАН, Георги Василев от ИМ-БАН и Светлана Сапунова за тяхната ценна помощ при провеждането на лабораторните експерименти, обработката на информацията и критичния коментар на тази деликатна материя.

Литература:

1. Иванова, Т. Н., П. Т. Костов, Н. А. Кынчев, С. Г. Славчев, Изследование Гидродинамических Свойств Субстрата для Выращивания Растений в Условиях Невесомости, XX совещание ПДРГ по КБМ программы "Интеркосмос", Берлин, ГДР, 18-22.05.1987, стр. 191.
2. Slavchev, S.I., M. Gerdzhikova, Mathematical Modelling of the Moisture Transfer in a Substrate Medium under Conditions of Weightlessness, CLSR Space Physics Department, Preprint № CLSR-85-03, 1985.
3. Zakharov, S.B., Some Agro-physical Properties of the Balkanine Substrate for the Svet Greenhouse Regarding the Ground Stage of the Studies, Proc. Second Micro-Symposium "Svet-90", Varna, Bulgaria, October 5-11, 1990, pp. 56-66.
4. Иванова, Т., П. Костов, М. Герджикова, Н. Кынчев, И. Стоянов, Ю. Шайдоров, Г. Мелешко, Результаты исследования характеристик субстрата "Балканин" в условиях невесомости, Доклад XIX-го Совещания ПДРГ по КБМ программы "Интеркосмос", Гавана, Куба, 5-12 апреля 1986, стр. 26.
5. Peiris, Tennakone, Rate of rise of a liquid in a capillary tube, Am. J. Phys. 48 (5), 1980, p. 415.