

ПОВЕДЕНИЕ НА ДАТЧИКА ЗА ОТНОСИТЕЛНА ВЛАЖНОСТ НА ВЪЗДУХА В КОСМИЧЕСКА ОРАНЖЕРИЯ „СВЕТ” ПО ВРЕМЕ НА 54 ДНЕВЕН ЕКСПЕРИМЕНТ В МИКРОГРАВИТАЦИЯ

Пламен Костов

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

Ключови думи: космическа оранжерия „Свет”, орбитална станция „Мир”, технологичен модул „Кристал”, относителна влажност на въздуха, датчик, локално прегряване, преовлажняване.

Резюме: Основна задача на първия етап от експлоатацията на космическа оранжерия „Свет”, разработена в Института за космически изследвания - БАН, София, беше, да се потвърди нейната работоспособност на борда на орбиталната станция (ОС) „Мир”. Някои особености от работата на апаратурата не са публикувани и обсъждани досега. Цел на това изследване е да се оцени поведението на датчика за относителна влажност на въздуха (ВВ) в условия на микрогравитация. Налични документи, проведени измервания и изчисления доказват, че датчикът ВВ е работил нормално през цялото време на космическия експеримент от 1990 г. Изчислено е, че в условията на принудителна вентилация (0,25 м/сек) в оранжерията, влажността на въздуха в зоната на растенията е практически равна на влажността на въздуха в ОС. За първи път се докладват данни от датчиците за температура ТВ2 и за влажност ВВ, които са регистрирали явленията „локално прегряване” (до 35°C) и „локално преовлажняване” (до 90%) на въздуха в зоната на растенията в периода 41-43 ден от експеримента. Анализирани са условията за поява на тези явления. Констатирано е, че поради безотказната работа на по-голямата част от апаратурата, могат да бъдат изяснени някои детайли от работата на оранжерията, на поддържащия екип и на екипажа на ОС „Мир” по време на експеримента. Направен е извод, че при изработването и комплектуването на бъдещи изделия е необходим входящ контрол на всеки възел по предварително съгласувана методика.

AIR HUMIDITY SENSOR BEHAVIOR IN THE SVET SPACE GREENHOUSE DURING A 54-DAY MICROGRAVITY EXPERIMENT

Plamen Kostov

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

Key words: Svet space greenhouse, relative air humidity, sensor, Mir orbital station, Kristall technology module, local overheating and over humidity.

Abstract: A primary goal of the first exploitation stage of the Svet Space Greenhouse, developed in the Space Research Institute – BAS, Sofia, was to verify the equipment operating efficiency onboard the Mir Orbital Station. Some special features of the hardware operation have not been published and discussed till now. The objective of this work is to assess the relative humidity (RH) sensor behavior under microgravity. Available documents, measurements and calculations suggest that the RH sensor functioned normally all the time during the 1990 space experiment. It was calculated that under the forced ventilation conditions in Svet (0,25 m/sec) the air humidity in the plant area was practically at the same level as in the Orbital Station environment. Experimental data from the temperature (AT2) and RH sensors, recording “local overheating” (up to 35°C) and “local over humidity” (up to 90%) in the plant area at the 41-43rd day of the experiment are reported for the first time. The conditions in which these phenomena appear are analyzed. It was ascertained that because of the flawless equipment functioning some details in the hardware operation and the actions of the experiment supporting team and Mir space crew during the experiment can be explained. The conclusion was made that when such equipment is produced and assembled in the future input control of each assembly according to preliminary coordinated methods will be necessary.

Използвани съкращения

КО „Свет”	космическа оранжерия „Свет”
ОС „Мир”	орбитална станция „Мир”
ТМ „Кристал”	технологичен модул „Кристал”
МКС	Международна космическа станция
*ИМБП - МЗ, Москва	Институт медико-биологических проблем - Министерство здравеохранения
*ИФР - БАН, София	Институт по физиология на растенията - Българска академия на науките
*ИКИ - БАН, София	Институт за космически изследвания - Българска академия на науките
*ЦЛФХМ - БАН, София	Централна лаборатория по физикохимична механика - Българска академия на науките
ЛО-1, ЛО-2	летателни образци № 1 и № 2 на КО „Свет”; № 2 е летял на ОС „Мир”
БУ	блок за управление на КО „Свет”
БВР	блок за развитие на растенията на КО „Свет”
БО	блок за осветление на растенията в КО „Свет”
ВС	вегетационен съд за развитие на корените на растенията
параметър „ВВ”	относителна влажност на въздуха в БВР
параметър „ТВ1”	температура на входящия въздух в КО „Свет”
параметър „ТВ2”	температура на въздуха в БВР на КО „Свет”
параметър „ППО”	продължителност на периода на осветление на растенията
АЦП	аналогово-цифров преобразувател в състава на БУ

* Отбелязаните имена на институции се отнасят за 80-те години на ХХ век.

Въведение

През 80-те години на ХХ век беше извършена научноизследователска и проектно-конструкторска работа по създаването на КО „Свет”. Бяха произведени няколко пълни комплекта апаратура. През 1990 г. един от двата летателни комплекта (ЛО-2) беше монтиран на борда на ТМ „Кристал”, който беше изведен в орбита на 31 Май 1990 г. и присъединен към ОС „Мир” на 10 Юни 1990 г. Първият космически експеримент с КО „Свет” беше проведен в периода 15.06÷08.08 1990 г. Резултати от работата на КО „Свет” са докладвани в [1, 2].

Основна задача на първия етап от експлоатацията на КО „Свет” беше да се получи потвърждение за нейната работоспособност в космически условия и да бъдат оценени продуктивността и особеностите на онтогенезата и морфогенезата на растенията, отгледани в микрогравитация.

Данни за някои измервани параметри на околната среда в КО „Свет” не са съобщавани и анализирани в публикации. Например, поведението на датчика ВВ и данните, получени от него, не са обсъждани. Участниците в експеримента са приели, че данните от този датчик са неадекватни и вероятно той е повреден.

Цел на изследването е да се направи оценка на поведението на датчика ВВ в условия на микрогравитация, както и на останалите блокове на КО „Свет”, имащи влияние върху работата на този датчик. Публикуването на резултатите от това изследване е насочено към повишаване на качеството на работа при една бъдеща разработка.

Предмет на това изследване са телеметричните данни от първия космически експеримент с КО „Свет” през 1990 г., публикации за резултатите от експеримента, техническата документация на ЛО-1, ЛО-2 [3], прототипите на използваните в КО „Свет” възли и др., които съдържат информация за работата на датчик ВВ на Земята и в микрогравитация.

Материали и методи

Относителната влажност на въздуха в БВР е един от климатичните параметри в зоната на листата на растенията, който е наблюдаван и регистриран. Датчикът ВВ, заедно с датчик за температура ТВ2 и с датчик за осветление ППО, са монтирани в цилиндричен блок, който е съединен БО с висяща щанга (Фиг. 1). Вентилатор, разположен в БО, създава принудителен въздушен поток със скорост 0,2-0,3 м/сек през целия обем на оранжерията в посока отдолу нагоре. Блокът с датчиците е обдухван непрекъснато от влизания в оранжерията въздух от ТМ „Кристал”, освен в случаите на първоначално зареждане на ВС с вода (Програма 2).

Датчикът ВВ е изцяло българска разработка и е проектиран от Христо Добрев, физикохимик в ЦЛФХМ при БАН. По-подробно описание може да бъде намерено в [4]. Датчикът е от потенциометричен тип. Той представлява две галванични клетки, едната от които е херметически капсулована при влажност 40%, а другата има пряк контакт с околния въздух. Двете клетки са свързани последователно и противофазно за температурна компенсация на изходния сигнал. Датчикът е покрит с въздухопропусклива хидрофобна материя. Неговите размери са - диаметър 6 мм и височина 12 мм.



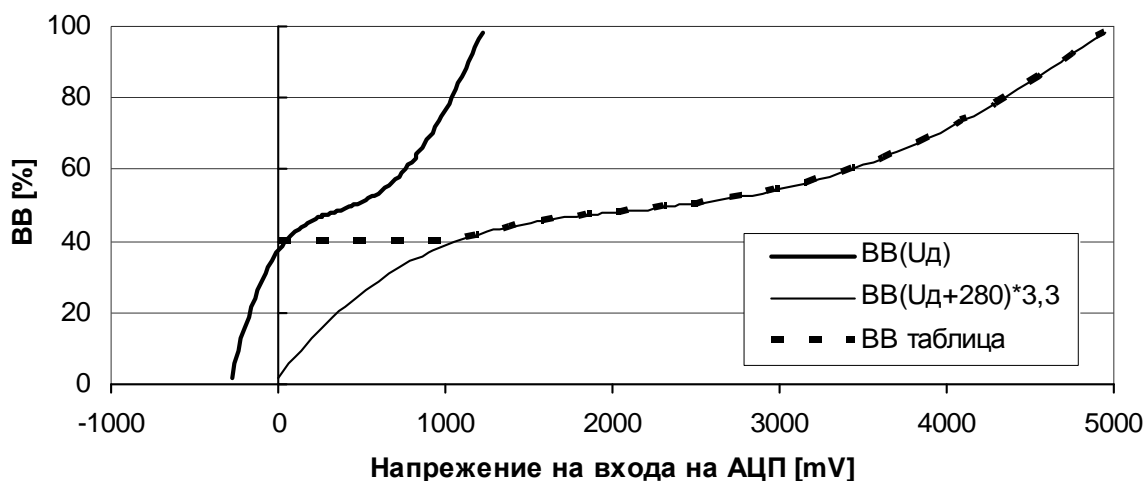
Фиг. 1. (а.) Поглед в камерата за развитие на листата в БВР и (б.) външен вид на блока с датчици ВВ, ТВ2 и ППО, монтиран на висяща щанга от БО, по време на бордовия експеримент

За снемане на градуировъчната характеристика на датчика беше проектиран уред за поддържане на постоянна относителна влажност на въздуха в една измервателна камера при различни температури на въздуха. С негова помощ беше определена преобразователната характеристика на датчика $BV = f(U_d)$, [5], която се описва с уравнението:

$$BV = B_0 + B_1 \cdot U_d + B_2 \cdot (U_d)^2 + B_3 \cdot (U_d)^3 + B_4 \cdot (U_d)^4,$$

където: $B_0 = 37,2189266564$; $B_1 = 0,066654491889$; $B_2 = -1,583873690E-04$;
 $B_3 = 1,88311E-07$; $B_4 = -5,7E-11$; U_d - изходно напрежение на датчика в mV.

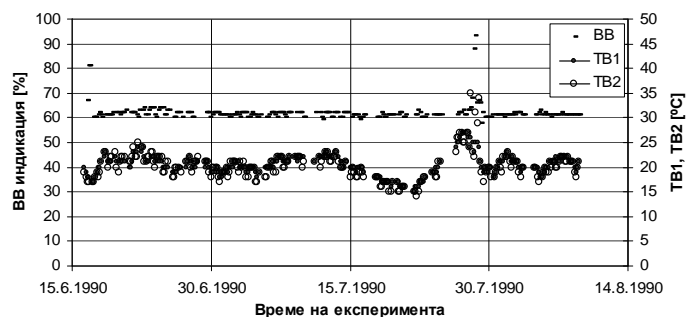
Стойностите на BV за всяка стъпка на U_d от 20 mV са записани в EPROM R.9.1. на БУ като електронна таблица за преобразуване на U_d в проценти BV (40-99%), фиг. 2 [BV(U_d)]. В процеса на лабораторните изпитания беше направено електронно отместване на U_d с +280 mV и последващо усилване 3,3 пъти, фиг. 2 [BV(U_d+280)*3,3]. Това нормиране на U_d се наложи поради факта, че част от характеристиката на датчика има отрицателни стойности на U_d , а използваният АЦП работи само с положителни входни напрежения в диапазона 0÷+5 V. Допълнително беше поставено изискване, входните напрежения $U_{вх-АЦП}$ от 0 до 1120 mV да се изобразяват и регистрират като 40% BV. Новата преобразователна характеристика е показана на фиг. 2 [BV_{таблица}], а новата таблица замени първоначално записаната в EPROM R.9.1.



Фиг. 2. Развитие на калибровъчната характеристика на датчика BV

Оперативен контрол на летателния експеримент от 1990 г. е осъществен от екип руски учени, под ръководството на А. Л. Машинский в ИМБП, Москва, който анализира получената телеметрична информация от предходните 24 часа и предава команди до космонавтите с помощта на радиограми. Закъснението във времето, от възникване на извънредна ситуация до извършване на исканите промени в работата на КО „Свет“, е 24-48 часа.

Резултати от летателния експеримент 1990 г.



Фиг. 3. Телеметрични данни на параметрите ВВ и ТВ2 в зоната на листата и на ТВ1 на входящия въздух в КО „Свет“ от ТМ „Кристал“ по време на летателния експеримент от 1990 г.

На фигура 3 е начертана графика на параметрите ВВ, ТВ1 и ТВ2 по получените телеметричните данни от КО „Свет“ за целия космически експеримент - 16.06.-08.08. 1990 г.

Данните за ВВ показват едно монотонно поведение със средна стойност 62% и малка динамика. Температурният датчик ТВ1 измерва температурата на въздуха в ТМ „Кристал“ и ОС „Мир“, която е поддържана около $20 \pm 3^\circ\text{C}$, и регистрира една по-голяма динамика в периода 20-29 Юли, когато температурата в ТМ „Кристал“ се понижава до 15°C със скорост $1^\circ\text{C}/\text{денонощие}$, след което бързо се повишава до 27°C със скорост $2,4^\circ\text{C}/\text{денонощие}$. Температурният датчик ТВ2 отчита сходни стойности с ТВ1, а в периода 27-28 юли регистрира локално прегряване на въздуха 35°C в зоната на листата на растенията на КО „Свет“.

Анализ на резултатите и дискусия

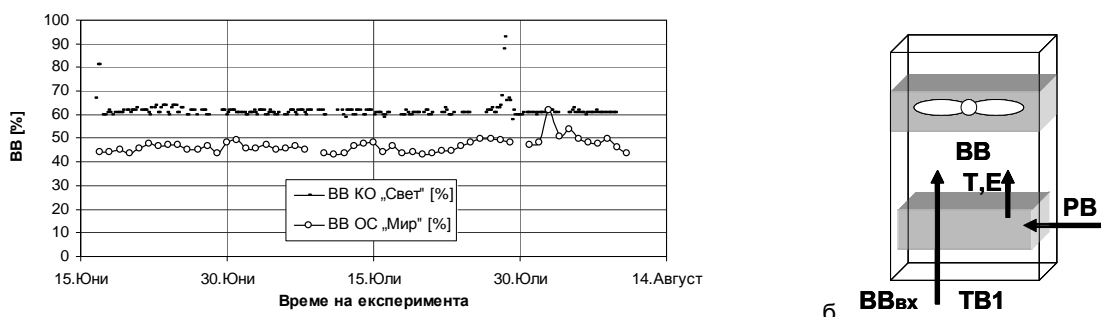
За проведеното изследване са използвани оригиналните телеметрични данни от КО „Свет“ за летателния експеримент от 1990 г., научни публикации, протоколи от съвещания, от ПСИ и лична кореспонденция и др.

Данни за поведението на датчиците ВВ, монтирани в няколко комплекта КО „Свет“, бяха потърсени в протоколите от изпитания ПСИ-1, ПСИ-2, актове за ремонтни дейности, електрически схеми на блоковете, обслужващи датчик ВВ, реалната макетна платка на нормиращия усилвател на датчика, която служи за еталон при изработването на летателните бройки. Изследваните документи показаха, че електронните елементи, монтирани на макетната платка съответстват на електрическите схеми, приложени в документацията на изделието. В документите на едно от изпитанията ПСИ-1 на ЛО-1 е записано разминаване в показанията на датчика ВВ и на еталонен психрометър над допустимото, което е наложило пренастройка на нормиращия усилвател на датчика.

Съществуват две независими информации за това, че на борда на руските орбитални станции от това време („Салют“ и „Мир“) е поддържана ниска влажност на въздуха. На съвещание в Москва през 1983 г. Машинский информира, че на станциите „Салют 6, 7“ е поддържана влажност около 40%, неподходяща за развитието на висши растения. През 2001 г. д-р Новикова от ИМБП съобщи в разговор, че на обитаеми обекти (ОС „Мир“, МКС) се поддържа ниска влажност с цел максимално забавяне на развитието на плесени и микроби.

С любезното съдействие на д.б.н. В. Н. Сычѐв от ИМБП, Москва, бяха получени данни за влажността на въздуха на ОС „Мир“ за времето на експеримента. Влажността е регистрирана в базовия модул на ОС „Мир“, но специалистите са изразили увереност, че данните могат да се осреднят за целия комплекс.

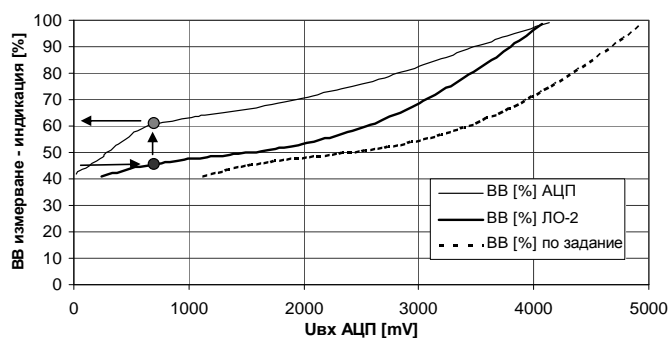
На фигура 4.а. са представени данните за ВВ, регистрирани от служебната система на ОС „Мир“ и от КО „Свет“ за времето на експеримента. Може да се отбележи, че средната стойност на ВВ, поддържана на ОС „Мир“, е била $46\% \pm 3\%$, с изключение на периода 2-4 август 1990 г., когато към ОС „Мир“ е присъединен транспортният кораб ТМ-10 на следващата експедиция ЭО-7. Присъединяването е извършено от страната на модула „Квант-1“, намиращ се на противоположния край на ОС „Мир“ спрямо ТМ „Кристал“. Вероятните вариации на ВВ в района на КО „Свет“ са били по-малки от отчетените на ОС „Мир“ в този кратък период от време. Освен това, за времето на експеримента не са провеждани експерименти с допълнителни източници на влага в ТМ „Кристал“, а само експерименти с електрически пещи.



а. б.
 Фиг. 4. (а) - Сравнение на данните за ВВ, регистрирани от КО „Свет“ и от служебната система на ОС „Мир“ и (б) - Оценка на влиянието на транспирацията и на евапорацията (Т,Е) върху повишаването на ВВ в зоната на растенията

За да се оцени влиянието на транспирацията от растенията и на евапорацията от ВС (Т,Е) върху повишаването на ВВ, са направени изчисления за водния баланс във въздуха в зоната на датчика (фигура 4.б.). Началните условия са: обем на зоната - $0,0225 \text{ m}^3$; скорост на въздушния поток - $0,25 \text{ m/s}$; влажност на входящия въздух в КО „Свет“ $ВВ_{вх} - 46\%$ при температура на въздуха $ТВ1 - 21^\circ\text{C}$; среден разход на вода (РВ) - $0,2 \text{ л/денонощие}$. Изчисленията показват, че ВВ се повишава с $0,5\%$ вследствие на допълнително внесените водни пари от транспирация и евапорация в зоната на датчика. Следователно, показанията на датчика представляват стойностите на ВВ в ТМ „Кристал“, освен в случаите, когато вентилаторът на КО „Свет“ е изключен (фиг. 6).

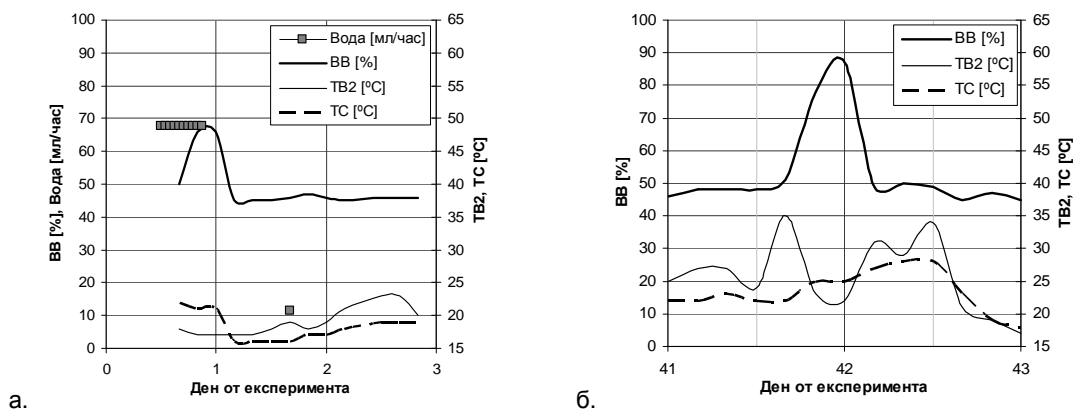
Анализът на резултатите от направените проучвания показва, че регистрираната ВВ от датчика на КО „Свет“ е нереално висока и следва да се потърси причината за това. За целта беше проверен записът на електронната таблица за преобразуване на $U_d \text{ [mV]}$ във ВВ [%], съгласно фигура 2, направен в EPROM R.9.1. на БУ. Резултатите от измерването са представени на фигура 5. Получената крива [ВВ [%] АЦП] съществено се различава от необходимата [ВВ [%] по задание]. Това разминаване на двете таблици вероятно е наложило на някакъв етап от изпитанията на ЛО-2, електрическият сигнал от датчика да бъде отместен с около 1000 mV наляво, [ВВ [%] ЛО-2]. Само в такъв случай, реални стойности на ВВ около 46% могат да бъдат регистрирани от КО „Свет“ като 62% . Стрелките на фигура 5 показват пътя на тази трансформация.



Фиг. 5. Съвместна графика на електронната таблица на преобразуване [ВВ [%] АЦП], записана в EPROM R.9.1., на калибровъчната крива на [ВВ [%] по задание], и на вероятно отместената характеристика [ВВ [%] ЛО-2] на датчика с около 1 V , наляво от необходимата по задание

Записът на неточни стойности за калибровъчната характеристика в EPROM R.9.1. на БУ е най-вероятната документирана причина за несъответствието между реално измерената и регистрираната стойности на ВВ. Това може да обясни и други случаи по време на разработката, при които, предварително нормираното изходно напрежение на всеки датчик се е налагало да бъде променяно, за да се сближат показанията на контролен психрометър с тези на датчика. Такива корекции са създали впечатление за неточна работа на датчика ВВ, но причината за това не е била потърсена.

Резултатът от направената оценка дава увереност, че телеметричните данни за ВВ могат да бъдат преизчислени съгласно кривите от фигура 5, а така получената информацията от датчика ВВ на КО „Свет“ да бъде приета за достоверна. Част от преизчислените стойности на ВВ са представени графично на фигура 6.



Фиг. 6. (а) - Повишаване на ВВ по време на начално овлажняване на субстрат „Балканин” с 68 мл/час вода в продължение на 10 часа; (б) - Явленията „локално прегряване и преовлажняване” на въздуха в зоната на растенията, регистрирани от датчиците ТВ2 и ВВ по време на температурна инверсия

Графиката на фигура 6.а. представя ВВ по време на изпълнение на „Програма 2” за първоначално овлажняване на субстрата. Тази програма се характеризира с инжектиране на 680 мл вода в обема на субстрат „Балканин” (среда за развитие на корените на растенията във ВС), в продължение на 10 часа. Характерно за субстрат „Балканин” е повишаването на неговата температура по време на първоначално овлажняване, вследствие на химически реакции от взаимодействието на химическите вещества, с които и обогатен субстрата, с инжектираната вода. По време на изпълнението на тази програма, вентилаторът на КО „Свет” е изключен. Така, въздухът в БВР остава изолиран от средата на ТМ „Кристал” и се създават условия за получаване на локална температурна инверсия - температурата на влажния субстрат ТС става по-висока от температурата на въздуха ТВ2 в зоната на листата над ВС. ВВ се е повишила с 20-25% за около 12 часа по данните от датчика ВВ. Това поведение на ВВ в микрогравитация е сходно с всички измервания на ВВ при първоначално зареждане на субстрат „Балканин” с вода, документиран при изпитанията ПСИ на КО „Свет” на Земята.

Графиката на фигура 6.б. показва регистрираното от датчика ВВ явление „локално преовлажняване” в зоната на листата на растенията. При една подадена неточна команда от наземния екип, обслужващ експеримента, и последвалото неправилно изпълнение на тази команда, космонавтите изключват всички изпълнителни механизми на КО „Свет”, с изключение на осветлението. При отсъствие на принудителна вентилация в КО „Свет”, осветлението от БО повишава температурата ТВ2 в зоната на листата над допустимата +32°C и автоматика изключва БО. Осветлението отново се включва при понижаване на температурата ТВ2 до +29°C. Това се повтаря няколкократно. В същото време, температурата на мокрия субстрат ТС във ВС с обем 10 дм³ непрекъснато се повишава и в определен момент тя превишава температурата на въздуха ТВ2. При получената температурна инверсия започва интензивно изпарение на вода от мокрия субстрат през всички отвори на ВС. Този пик във влажността (до 90%) е отчетен от датчика ВВ. Явлението е регистрирано по време на едно критично съвпадение на технически и организационни проблеми на борда на ОС „Мир”, благодарение на датчика ВВ.

Условията за появата на плесен върху повърхността на ВС, [6], наблюдаваната от космонавтите веднага след описаните по-горе локално прегряване (35°C) и преовлажняване (89%) с продължителност около 30 часа, сега могат да бъдат обяснени по-добре.

Намерената техническа причина за неточната регистрация на данните от датчика ВВ, дава основание да се допусне, че са съществували и други подобни обстоятелства, които да обяснят понижената динамика в показанията на датчика в областта на ниска влажност (под 45%). За това, обаче, не бяха намерени документиран факти.

Заклучение

Въз основа на документи, проведени измервания и изчисления може да се твърди, че са намерени доказателства, които да потвърдят нормалната работа на датчик ВВ за цялото време на космическия експеримент от 1990 г. Благодарение на безотказната работа на датчиците ТВ1, ТВ2, ТС, ВВ и ППО могат да бъдат изяснени някои детайли от работата на КО „Свет”, поддържащия екип и екипажа на ОС „Мир”. Регистрирани са явленията „локално прегряване и преовлажняване” на 42-ия ден от експеримента и са анализирани условията за тяхната поява.

Може да се направи извода, че при изработването и комплектуването на бъдещи изделия е необходимо да се осъществява задължителен входящ контрол на всеки възел от апаратурата по предварително съгласувана методика.

Благодарност

Авторът изказва благодарност на Владимир Н. Сычѐв от ИМБП, Москва, Георги Василев от ИМ-БАН, Диана Антонова и Светлана Сапунова от ИКСИ-БАН, за тяхната ценната помощ и подкрепа при издирването и анализа на голям обем информация, част от която е представена в тази публикация.

Литература:

1. Berkovich, Y. A., T. A. Derendyaeva, I. E. Ivanova, A. L. Mashinskiy, G. I. Meleshko, T. N. Ivanova, Preliminary Results at the First Stage of the Svet Space Greenhouse Exploitation in Space Flight, Second Micro-Symposium „Svet-90”, Varna, Bulgaria, October 5-11, pp. 25-36, 1990.
2. Ivanova, T. N., I. W. Dandolov, First Telemetric Data Processing and Brief Analysis of Svet Greenhouse Operations on Board Mir Space Station, Second Micro-Symposium „Svet-90”, Varna, Bulgaria, October 5-11, pp. 37-46, 1990.
3. Техническо задание КМ 01.010.00.00 ТЗ, (редакция 4), Апаратура Оранжерея „Свет”, 16.05.1989 г, архив на секция „Космически биотехнологии” (КБ).
4. Ivanova, T. N., P. T. Kostov, S. M. Sapunova, H. S. Dobrev, I. W. Dandolov, Sensors and Methods for Measurements of the Environment Parameters in Svet Space Greenhouse, Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, Tome 45, № 11, pp. 55-58, 1992.
5. Техническо задание за разработка на микропроцесорна система за КО „Свет”, архив на секция „КБ”.
6. Обсъждане на резултатите от летателния експеримент с КО „Свет”, Втори микро симпозиум „Свет-90”, Варна, 5-11.10.1990, архив на секция „КБ”.