

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ –  
ИНСТИТУТ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ РАН**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР**  
-----

**Ю.А.БЕРКОВИЧ, Н.М.КРИВОБОК, С.О.СМОЛЯНИНА, А.Н.ЕРОХИН**

**КОСМИЧЕСКИЕ ОРАНЖЕРЕИ:**

**НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ**

**ФИРМА "СЛОВО" МОСКВА**

**2005**

УДК 613.693 + 573.52 + 663.1  
ББК 28.089  
Б489

**Ю.А. Беркович, Н.М. Кривобок, С.О. Смолянина, А.Н. Ерохин. Космические оранжереи: настоящее и будущее. — М.: Фирма «Слово», 2005 — 368 с.**

Книга посвящена актуальной в космической технике проблеме: созданию устройств для выращивания растений на борту пилотируемого космического летательного аппарата для воспроизводства витаминной зелени для питания экипажа. В ней даны классификация и обзор существующих космических оранжерей, описано воздействие факторов космического полета на рост и развитие растений. Сформулирована постановка задачи оптимального проектирования космических оранжерей и описаны особенности проектирования основных подсистем таких устройств. Представлен новый класс космических оранжерей с самораздвигающимися посевами растений на выпуклых посадочных поверхностях и проанализированы его преимущества методом компьютерного моделирования продуктивности посевов. Результаты анализа подтверждены опытными данными. Предложены новая система корневого питания, полива и аэрации растений для условий невесомости, а также методы расчета параметров ее конструкции и рабочего режима. Описаны конструкции салятных конвейерных цилиндрических оранжерей с различными искусственными источниками света и приведены результаты экспериментов по выращиванию в них посевов зеленых растений. Обсуждаются тенденции будущего конструктивного развития производственных космических оранжерей.

Работа выполнена в ГНЦ РФ – Институте медико-биологических проблем РАН при поддержке Проекта № 2137 Международного научно-технического центра.

*Книга рекомендована в печать Ученым советом  
Государственного научного центра Российской Федерации  
Института медико-биологических проблем РАН*

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Г.И.МОРОЗОВ (Московский авиационный институт)  
доктор биологических наук, профессор И.И.СУДНИЦЫН (Московский государственный университет)

ISBN 5-900228-52-5

© Ю.А.Беркович, Н.М.Кривобок, С.О.Смолянина, А.Н.Ерохин, 2005  
© Фирма «Слово», 2005

**RF SRC – Institute for Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences  
International Scientific and Technical Center**

**Yu.A. Berkovich, N.M. Krivobok,  
S.O. Smolianina, A.N. Erokhin**

**SPACE GREENHOUSES:  
THE PRESENT AND THE FUTURE**

**Moscow, Slovo, Ltd.  
2005**

**Yu.A.Berkovich, N.M.Krivobok, S.O.Smolianina, A.N.Erokhin. Space greenhouses: The present and the future. – Moscow, Slovo, Ltd, 2005.**

The book deals with the issue of the day for space technology, i.e. construction of facilities to grow plants on piloted space vehicles to yield vitamin vegetables for space crew nutrition. It contains classification and review of the present-day space greenhouses, and description of the effects of spaceflight factors on growth and development of plants. The authors define the problem of optimal designing space greenhouses and highlight the design features of key subsystems of these facilities. A brand new class of space greenhouses with self-extending crops on convex planting surfaces is presented and advantages of computerized crop productivity modeling are analyzed. Results of the analysis have been corroborated by results of experiments. An original system for supplying roots with nutrients, water and air as well as methods of calculating design parameters and operation conditions are proposed. Constructions of cylindrical salad conveyers varying in artificial light sources are discussed and results of the experimental growth of leafy plants in these systems are analyzed. Consideration is given to the basic line of future progress in development of production space greenhouses.

The work was made at the RF SRC – Institute for Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences and with the financial support of the International Scientific and Technical Center (project # 2137).

ISBN 5-900228-52-5

© Yu. A. Berkovich, N. M. Krivobok, S. O. Smolianina, A. N. Erokhin, 2005  
© «Slovo», Ltd, 2005



## TABLE OF CONTENTS

PREFACE .....	16
INTRODUCTION .....	18
CHAPTER 1. CLASSIFICATION AND REVIEW OF THE PRESENT-DAY SPACE GREENHOUSES .....	30
1.1. Classification of present-day space greenhouses .....	30
1.2. Food greenhouses for ground-based operational prototypes of bio-technical life support systems .....	32
1.3. Space greenhouses to be used in the microgravity environment .....	39
1.4. Salad or vitamin space greenhouses to be used in microgravity .....	52
CHAPTER 2. effects of the environmental factors on plants in space greenhouses .....	63
2.1. Effects of the external factors of space flight .....	63
2.2. Effects of the dynamic factors of space flight .....	67
2.3. Effects of the space vehicle environment .....	73
2.3.1. Atmospheric gases .....	73
2.3.2. Atmospheric contaminants .....	81
2.3.3. Variations of air temperature and humidity, and air flows .....	87
2.3.4. Isotopic content of water .....	89
CHAPTER 3. DESIGNING OF SPACE GREENHOUSES .....	92
3.1. Setting up the design problem .....	92
3.1.1. Optimal design of space greenhouses .....	92
3.1.2. Crop structure .....	98
3.2. Classification of the basic subsystems and their characteristics .....	102

3.2.1. Growth system .....	103
3.2.2. Lighting system .....	104
3.2.2.1. Light source parameters .....	105
3.2.2.2. Optimization of the light status .....	115
3.2.2.3. Dependence of the greenhouse specific productivity on the light status .....	116
3.2.2.4. Principles and procedure of optimizing light status in space greenhouses .....	120
3.2.2.5. Choice of the light status parameters for particular cases .....	122
3.2.2.6. Duration of vegetation of good for eating vegetables .....	125
3.2.3. Root supply system .....	130
3.2.3.1. Overview of root supply methods .....	131
3.2.3.2. Main problems with providing mineral nutrition to plants growing in space greenhouses .....	136
3.2.3.3. Watering and aeration of root medium .....	142
3.2.3.4. Models of water transfer in capillary-porous root medium .....	149
3.2.3.5. Determination of the most effective range of water potential in root medium .....	154
3.2.3.6. RM design philosophy and plant productivity .....	165
3.2.3.7. Methodical problems of experimental studies of water transfer in microgravity and ground control .....	173
3.2.3.8. Development and test evaluation of artificial fibrous resin soil BIONA-V3 for space greenhouses .....	182
3.2.4. Gas composition control system .....	188
3.2.5. Air temperature and humidity control system .....	191
3.2.6. Monitoring and control system .....	195
 CHAPTER 4. MODERN RUSSIAN MODELS OF SPACE GREENHOUSES AND OUTLOOK FOR FUTURE .....	 203
4.1. Research space greenhouses Svet and Lada .....	204

4.1.1. Brief description of greenhouse Svet .....	204
4.1.2. Parameters of the plant environment in greenhouse Svet flown on orbital station MIR .....	211
4.1.3. Brief description of greenhouse Lada .....	214
4.1.4. Main results of space experiments with plants in greenhouse Svet .....	217
4.2. Experimental cylindrical conveyer-type greenhouses .....	219
4.2.1. Brief description of Phytocycle and Phytocycle-LED .....	219
4.2.2. Brief description of Vitacycle and Phytoconveyer .....	225
4.2.3. Experimental results of plants growth in cylindrical conveyer-type greenhouses .....	234
4.3. Concepts of production greenhouses for a mission to Mars and planetary outposts .....	242
<b>CHAPTER 5. OPTIMIZATION OF SPACE GREENHOUSE CHARACTERISTICS THROUGH IMPLEMENTATION OF SELF-EXTENDING CROPS ON CONVEX PLANTING SURFACES .....</b>	
5.1. Design of greenhouses with various forms of planting and illuminating surfaces .....	249
5.1.1. Greenhouses with spheric planting surface .....	249
5.1.2. Greenhouses with cylindrical planting surface .....	255
5.1.3. Greenhouses with toroidal planting surface .....	263
5.2. Volumes of crops on planting surface of varying form .....	267
5.3. Energy characteristics of different-type crops .....	270
5.4. Comparison of the efficiency of different layouts of space greenhouses with convex planting surface .....	275
5.5. Digital modelling of photosynthetic productivity of crops in greenhouses of different forms .....	278
5.5.1. Photosynthetic productivity model for crops growing on the convex cylindrical planting surface .....	278
5.5.2. Model of leaf area distribution along the crop height .....	279
5.5.3. Model of light distribution across the crop .....	280

5.5.4. Model of the photosynthesis-light curve .....	281
5.5.5. Description of simulation object .....	282
5.5.6 Evaluation of properties of self-opening crops in salad greenhouse using digital modelling .....	283
5.6. Main results of analysis of self-opening crops .....	287

CHAPTER 6. ROOT SUPPLY SYSTEM WITH REVERSE WATER DELIVERY  
THROUGH THE LOCKING MEMBRANE FOR A SPACE GREEN CONVEYER .....

6.1. Description and principle of operation of the reverse water delivery system .....	289
6.1.1. Reverse water delivery system for zero- and 1-g gravity .....	289
6.1.2. Work program of the reverse water delivery system .....	293
6.1.3. Critical relationship between parameters of the reverse water delivery system .....	295
6.2. Root supply system for a space conveyer-type greenhouse with cylindrical planting surface .....	296
6.2.1. Root module design .....	296
6.2.2. Root module assembly for a cylindrical green conveyer .....	298
6.2.3. Hydraulic circuit and diagrammatic work of the water delivery unit for cylindrical green conveyer .....	301
6.3. Calculation of the parameters of root supply system for cylindrical conveyer-type greenhouse .....	306
6.3.1. Optimization of parameters of the root supply system .....	306
6.3.2. Identification of the mathematical model of water migration across root modules with porous artificial soil .....	307
6.3.3. Parameters of the root module assembly for cylindrical conveyer-type greenhouse .....	312
6.3.4. Parameters of the work program of the root supply system with reverse water delivery .....	315
6.3.4.1. Volume and duration of water injection in root modules .....	315
6.3.4.2. Pause between water injection in and drain of root modules .....	322

6.3.4.3. Period of water drain from the root modules .....	324
6.3.4.3.1. Estimation of the length of transient drain process in RM with fresh artificial soil .....	324
6.3.4.3.2. Adjustment of the water drain process following vegetation .....	328
6.4. Test validation of the root supply system with reverse water delivery in experiments with leafy plants .....	329
CONCLUSION .....	331
References .....	335
Quoted patents .....	366

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

- БСЖО — биологическая система жизнеобеспечения;  
БТСЖО — биолого-техническая система жизнеобеспечения;  
ВП — водный потенциал;  
ЗВР — звено высших растений;  
ИЗП — искусственный заменитель почвы;  
ИКР — инфракрасная радиация;  
КЛА — космический летательный аппарат;  
КМ — корневой модуль;  
КО — космическая оранжерея;  
КОКОР — конвейерная овощная космическая оранжерея;  
КПД — коэффициент полезного действия;  
МДУ — медленно действующее удобрение;  
МКС — Международная космическая станция;  
МНТЦ — Международный научно-технический центр;  
НАСА — Национальное космическое агентство США;  
НД — насос-дозатор;  
ОГХ — основная гидрофизическая характеристика;  
ПДК — предельно допустимая концентрация;  
ПФД — порог фитотоксического действия;  
СЖО — система жизнеобеспечения;  
СКС — система корневого снабжения;  
СКУ — система контроля и управления;  
СРСГС — система регулирования состава газовой среды;  
СТВР — система термовлагорегулирования;  
ФАР — фотосинтетически активная радиация;  
ФХСЖО — физико-химическая система жизнеобеспечения;  
ХПЧ — хозяйственно полезная часть.

## СОДЕРЖАНИЕ

Вместо предисловия (О.Г.Газенко) .....	16
ВВЕДЕНИЕ .....	18
ГЛАВА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ КОСМИЧЕСКИХ ОРАНЖЕРЕЙ .....	30
1.1. Классификация современных космических оранжерей .....	30
1.2. Пищевые оранжереи для наземных моделей биолого-технических систем жизнеобеспечения .....	32
1.3. Исследовательские космические оранжереи для условий микрогравитации .....	39
1.4. Зеленные, или витаминные, космические оранжереи для условий микрогравитации .....	52
ГЛАВА 2. ВОЗДЕЙСТВИЕ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ НА РАСТЕНИЯ В КОСМИЧЕСКИХ ОРАНЖЕРЕЯХ .....	63
2.1. Воздействие на растения внешних факторов космического полета .....	63
2.2. Воздействие на растения динамических факторов космического полета .....	67
2.3. Воздействие на растения среды обитания внутри пилотируемого космического корабля .....	73
2.3.1. Воздействие на растения газовой среды в космическом корабле .....	73
2.3.2. Воздействие на растения загрязнителей газовой среды .....	81
2.3.3. Воздействие на растения колебаний температуры и влажности воздуха, а также скорости воздушного потока .....	87
2.3.4. Воздействие на растения изотопного состава воды .....	89
ГЛАВА 3. КОСМИЧЕСКИЕ ОРАНЖЕРЕИ КАК ОБЪЕКТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ .....	92
3.1. Постановка задачи проектирования космических оранжерей .....	92

3.1.1. Постановка задачи оптимизации конструкции космических оранжерей .....	92
3.1.2. Структура посева растений в космических оранжереях .....	98
3.2. Классификация основных подсистем космических оранжерей и их характеристики .....	102
3.2.1. Вегетационная система .....	103
3.2.2. Система освещения .....	104
3.2.2.1. Характеристики источников света для освещения растений .....	105
3.2.2.2. Оптимизация светового режима в космических оранжереях .....	115
3.2.2.3. Зависимость удельной производительности космической оранжереи от параметров светового режима .....	116
3.2.2.4. Критерии и процедура оптимизации параметров светового режима в космических оранжереях .....	120
3.2.2.5. Выбор параметров светового режима для космических оранжерей в частных случаях .....	122
3.2.2.6. Выбор длительности товарной вегетации в космических оранжереях .....	125
3.2.3. Система корневого снабжения .....	130
3.2.3.1. Обзор методов корневого снабжения .....	131
3.2.3.2. Обеспечение минерального питания растений в космических оранжереях .....	136
3.2.3.3. Обеспечение увлажнения и аэрации корнеобитаемой среды .....	142
3.2.3.4. Модели влагопереноса в капиллярно-пористой корнеобитаемой среде .....	149
3.2.3.5. Определение диапазона оптимальных водных потенциалов в корнеобитаемой зоне .....	154
3.2.3.6. Влияние конструктивных особенностей корневых модулей на продуктивность выращиваемых в них растений .....	165
3.2.3.7. Методические проблемы экспериментального исследования влагопереноса в условиях невесомости и при воздействии силы тяжести .....	173
3.2.3.8. Характеристики волокнистого ионообменного заменителя почвы "БИОНА-ВЗ" для космических оранжерей .....	182



3.2.4. Система регулирования состава газовой среды .....	188
3.2.5. Система термовлагорегулирования газовой среды .....	191
3.2.6. Система контроля и управления .....	195

**ГЛАВА 4. СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ КОСМИЧЕСКИХ ОРАНЖЕРЕЙ, РАЗРАБОТАННЫХ С РОССИЙСКИМ УЧАСТИЕМ, И КОСМИЧЕСКИЕ ОРАНЖЕРЕИ БУДУЩЕГО .....**

<b>4.1. Научно-исследовательские космические оранжереи "Свет" и "Лада" .....</b>	<b>204</b>
4.1.1. Краткое техническое описание оранжереи "Свет" .....	204
4.1.2. Параметры среды обитания растений в оранжереи "Свет" на борту орбитального комплекса "Мир" .....	211
4.1.3. Краткое техническое описание оранжереи "Лада" .....	214
4.1.4. Основные результаты космических опытов с растениями в оранжерее "Свет" .....	217
<b>4.2. Экспериментальные образцы производственных цилиндрических конвейерных оранжерей .....</b>	<b>219</b>
4.2.1. Краткое техническое описание оранжерей "Фитоцикл" и "Фитоцикл СД" .....	219
4.2.2. Краткое техническое описание оранжерей "Витацикл" и "Фитоконвейер" .....	225
4.2.3. Результаты наземных опытов с растениями в цилиндрических конвейерных оранжереях "Фитоцикл" и "Фитоцикл СД" .....	234
<b>4.3. Проекты оранжерей для марсианской экспедиции и будущих планетных баз .....</b>	<b>242</b>

**ГЛАВА 5. ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКИХ ОРАНЖЕРЕЙ ЗА СЧЕТ ОРГАНИЗАЦИИ САМОРАЗДВИГАЮЩИХСЯ ПОСЕВОВ РАСТЕНИЙ НА ВЫПУКЛЫХ ПОСАДОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ .....**

<b>5.1. Оранжереи с различными формами посадочной и светящей поверхностей .....</b>	<b>249</b>
5.1.1. Оранжереи со сферической посадочной поверхностью .....	249
5.1.2. Оранжереи с цилиндрической посадочной поверхностью .....	255
5.1.3. Оранжереи с тороидальной посадочной поверхностью .....	263

5.2. Объемные характеристики посевов на посадочных поверхностях различной формы .....	267
5.3. Энергетические характеристики посевов .....	270
5.4. Сравнение эффективности различных компоновок космических оранжерей с выпуклыми посадочными поверхностями .....	275
5.5. Компьютерное моделирование фотосинтетической продуктивности посевов в оранжереях различной формы .....	278
5.5.1. Модель фотосинтетической продуктивности самораздвигающегося посева на цилиндрической посадочной поверхности .....	278
5.5.2. Модель распределения фотосинтезирующей поверхности по высоте посева .....	279
5.5.3. Модель светораспределения в посеве .....	280
5.5.4. Модель световой кривой фотосинтеза посева .....	281
5.5.5. Описание физической модели для идентификации математического описания конвейерных посевов .....	282
5.5.6. Оценка свойств самораздвигающихся посевов растений в салатной оранжерее методом компьютерного моделирования .....	283
5.6. Основные результаты анализа свойств самораздвигающихся посевов растений .....	287
ГЛАВА 6. СИСТЕМА КОРНЕВОГО СНАБЖЕНИЯ С РЕВЕРСИВНОЙ ВОДОПОДАЧЕЙ ЧЕРЕЗ ЗАПОРНУЮ МЕМБРАНУ ДЛЯ КОНВЕЙЕРНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ОРАНЖЕРЕИ .....	289
6.1. Описание и принцип действия системы реверсивной подачи воды в корневые модули .....	289
6.1.1. Устройство системы реверсивной водоподачи для невесомости и наземных условий .....	289
6.1.2. Циклограмма работы системы реверсивной водоподачи .....	293
6.1.3. Критериальные соотношения между параметрами системы реверсивной водоподачи .....	295
6.2. Система корневого снабжения для конвейерной космической оранжереи с цилиндрической посадочной поверхностью .....	296
6.2.1. Конструкция корневого модуля .....	296

6.2.2. Устройство блока корневых модулей для конвейерной цилиндрической оранжереи .....	298
6.2.3. Гидравлическая схема и циклограмма работы блока водообеспечения для конвейерной цилиндрической оранжереи .....	301
6.3. Расчет параметров системы корневого снабжения для цилиндрической конвейерной оранжереи .....	306
6.3.1. Оптимизация параметров системы корневого снабжения .....	306
6.3.2. Идентификация математических моделей движения воды в корневых модулях с пористым почвозаменителем .....	307
6.3.3. Расчет параметров блока корневых модулей цилиндрической оранжереи .....	313
6.3.4. Расчет параметров циклограммы работы системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей .....	315
6.3.4.1. Определение объема и длительности закачки воды в корневые модули .....	315
6.3.4.2. Определение длительности паузы между закачкой и откачкой воды в корневых модулях .....	322
6.3.4.3. Определение длительности откачки воды из корневых модулей .....	324
6.3.4.3.1. Оценка длительности переходного процесса откачки из корневого модуля со свежезаправленным почвозаменителем .....	324
6.3.4.3.2. Коррекция процесса откачки воды из корневых модулей после вегетации растений .....	328
6.4. Наземные испытания системы корневого снабжения растений с реверсивной водоподачей в вегетационных опытах с зелеными растениями .....	329
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	331
ЛИТЕРАТУРА .....	335
СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ АВТОРСКИХ СВИДЕТЕЛЬСТВ И ПАТЕНТОВ .....	366

## Зеленые помощники космонавтов

(Вместо предисловия)

С началом XXI века все отчетливее стала вырисовываться перспектива будущих межпланетных полетов человека. Можно предположить, что через 15–20 лет будет осуществлена пилотируемая экспедиция на Марс.

Более чем 40-летний опыт пилотируемых полетов является хорошей, но все же недостаточной базой для подобного рода предприятия, существенной особенностью которого является не только продолжительность полета, но и его автономность – высокая степень «отрыва от Земли».

В ряду многих задач, еще требующих своего решения, является задача создания на космическом корабле систем жизнеобеспечения экипажа с достаточной для такого полета надежностью и высоким качеством среды обитания. Теперь уже ясно, что одним из путей улучшения среды обитания в условиях длительного полета является использование на борту корабля космических оранжерей с «зелеными помощниками космонавтов».

Константин Эдуардович Циолковский был первым, кто в начале минувшего столетия в общем виде сформулировал эту задачу. Примерно в то же время Фридрих Артурович Цандер осуществил экспериментальные попытки создания оранжерей «авиационной легкости» для космических кораблей. Однако мы мало знаем о его результатах поскольку до сих пор полностью не расшифрованы описывающие эти опыты стенографические записи.

Возрождение интереса и обстоятельные исследования в этой области следует отнести к началу космических исследований в середине прошлого века, а систематический характер они приобрели с началом эксплуатации отечественных орбитальных станций «Салют» и особенно «Мир».

Приятно отметить, что наши ученые традиционно занимали ведущее место в космическом растениеводстве. Это касается как исследования влияния разнообразных факторов космического полета на жизнедеятельность широкого круга растительных объектов, так и поиска технических решений обеспечения жизни растений в герметических объектах и космических кораблях.

Накопленные по этим проблемам экспериментальные данные опубликованы в огромном количестве журнальных статей, но обобщены в сравнительно ограниченном числе обзоров и монографий.

Предлагаемая вниманию читателей книга восполняет этот пробел и по существу впервые систематически излагает вопросы проектирования и эксплуатации устройств для выращивания растений в условиях космического полета.

Авторов, сотрудников Государственного научного центра Российской Федерации – Института медико-биологических проблем РАН, можно отнести к числу тех энтузиастов, которых не сломили трудности последнего десятилетия в материальном и техническом обеспечении российской науки. Несмотря на возникшие трудности, они продолжали экспериментировать с растениями и разрабатывать новые конструкции и технологии для эффективного выращивания растений в условиях невесомости.

Информация, полученная на станции "Мир", послужила основой для создания систем жизнеобеспечения растений в космических оранжереях, поэтому в монографии дан краткий исторический экскурс применения научно-исследовательских установок для космических экспериментов с растениями. Кратко освещен также опыт наземных исследований биолого-технических систем жизнеобеспечения людей в изолированных помещениях, в которых высшие растения являлись основой фотоавтотрофного звена. Среди них – опыты в Институте медико-биологических проблем, в которых некоторые из авторов принимали участие. Подобные исследования помогают, в частности, понять особенности технологии культивирования растений в более крупных космических оранжереях, которые должны быть развернуты на будущих планетарных и лунных базах.

В целом, эту книгу вряд ли можно отнести к чисто технической литературе. В ней достаточно новых биологических экспериментальных результатов, в том числе полученных авторами, важных для проектирования космической вегетационной техники. Приводятся сведения о различных методах космического растениеводства, дается анализ влияния условий среды, неизбежно отличающихся в оранжерее от естественных условий, на рост и развитие растений, освещаются вопросы подбора видовой структуры посева, а также содержится информация по другим смежным вопросам. Все это делает книгу полезной не только для конструкторов космических оранжерей, но и для растениеводов, биологов, биофизиков, инженеров, специалистов по системам жизнеобеспечения. Полезной эта книга будет и для студентов соответствующих специальностей.

Полагаю, что книга будет полезна для более глубокого понимания и адекватного решения современных проблем в области создания космических оранжерей, а также биолого-технических систем жизнеобеспечения космических экипажей. Будем надеяться на то, что предложенные авторами принципы проектирования и конструкции оранжерей найдут применение при создании оборудования межпланетных кораблей и космических баз будущего.

**О.Г. Газенко**

## ВВЕДЕНИЕ

С началом эры пилотируемых космических полетов перед человечеством встала новая практическая задача: обеспечение искусственной среды обитания для экипажей в гермокабинах ограниченного объема. Уже во времена основоположников космонавтики одним из перспективных путей создания адекватных условий для жизнедеятельности людей в гермокабинах во время длительных космических полетов считалось создание биорегенеративных систем жизнеобеспечения. Отличительной особенностью таких систем является организация регенерации веществ, потребляемых человеком, с помощью взятых на космический корабль наземных организмов: растений, животных, микробов и др. Так, еще в 1911 г. К.Э.Циолковский писал о средствах обеспечения существования людей в космическом полете: «Как земная атмосфера очищается растениями при помощи Солнца, так может возобновляться и наша искусственная атмосфера. Как на Земле растения своими листьями и корнями поглощают нечистоты и дают взамен пищу, так могут непрерывно работать для нас и захваченные нами в путешествие растения» (Циолковский, 1954). В 20-е годы нашего столетия другой пионер космонавтики Ф.А.Цандер сделал первые практические шаги на пути разработки «...оранжереи авиационной легкости... для поддержания жизни в герметически закрытом помещении в межпланетном корабле, на межпланетной станции, на Луне, на другой планете» (цитируем по: Газенко, 1998).

Начиная с 60-х годов методы и устройства для биологической регенерации среды обитания людей в гермокабинах стали предметом интенсивных наземных исследований в целом ряде стран, и особенно в СССР. В частности, были разработаны теоретические основы и первые физические модели биорегенеративных систем жизнеобеспечения (БСЖО) в Институте авиационной и космической медицины МО СССР, а затем в Институте медико-биологических проблем Минздрава в Москве под руководством Е.Я.Шепелева (1960–1963 гг.), а чуть позже – в Институте биофизики в Красноярске под руководством И.И.Гительсона и И.А.Терскова (1964 г.). Поскольку существование живых организмов в гермообъемах требует наличия технических систем, поддерживающих потребные параметры среды их обитания, БСЖО часто называют еще и биотехническими системами (БТСЖО). В настоящее время многие специалисты в области космонавтики связывают перспективы расширения деятельности человечества в космическом пространстве именно с созданием БТСЖО (Газенко, 1998; Мелешко и Шепелев, 1992; Olson et al., 1987; Bartsev et al., 1997).

Со времени зарождения идеи о биологической регенерации среды обитания человека стало общепринятым мнение о том, что непременной составной частью в БТСЖО должны стать ценозы фотоавтотрофных растений. Необходимость введения такого звена в состав космических систем жизнеобеспечения объясняется уникальной способностью фотосинтезирующих растений к утилизации солнечной энергии с осуществлением при этом ряда важнейших функций: синтеза органических веществ для воспроизводства продуктов питания для экипажа и других гетеротрофных организмов, регенерации атмосферы в обитаемой кабине, регенерации воды, а также возвращения в кругооборот части химических элементов, содержащихся в растительных отходах и продуктах метаболизма гетеротрофных организмов (Гительзон и др., 1975). Вопрос о видовой структуре фотоавтотрофного звена БТСЖО также активно обсуждался в литературе (Bartsev et al., 1997; Мелешко и др., 1994; Мелешко и Шепелев, 1994; Терсков и др., 1979, Березовский и др., 1977, Гительзон и др., 1976). Большинство специалистов в настоящее время придерживаются мнения, что в состав этого звена будут входить как высшие растения, так и фотоавтотрофные микроводоросли, однако по доле участия в общем круговороте веществ основную часть фотоавтотрофного звена БТСЖО должны составлять высшие растения, поскольку они могут давать полноценные и традиционно используемые человеком продукты питания и корма для животных, в то время как биомасса микроводорослей может употребляться в пищу и усваиваться организмом человека лишь в очень ограниченных количествах: не более 5–10 % веса пищевого рациона (Газенко, 1998; Мелешко и Шепелев, 1994). Между тем основным условием замкнутости БТСЖО является потребление внутри системы всех производимых продуктов.

Оценки проектировщиков подтвердили такие прогнозы. Например, в разработанной в 80-е годы в СССР во ВНИИ "Биотехника" под руководством Г.И. Морозова 6-звенной модели БТСЖО для орбитальной станции, включающей высшие растения, микроводоросли, шляпочные грибы и птиц (кур), а также подсистему переработки и утилизации отходов с использованием уробактерий, доля массы звена высших растений с посадочной площадью 33 м<sup>2</sup> составляла 80 %, а доля его энергопотребления – 86 %. На рис. В.1 представлена упрощенная схема БТСЖО, построенной на основе высших растений, приведенная в работе (Volk, Rummel, 1987).

Однако при первых же попытках количественных оценок характеристик БТСЖО, основанных на культивировании растений (Дель Дюка и Конеччи, 1967; Jagow, Thomas, 1967; Чучкин и др., 1975) были получены обескураживающие результаты. Оказалось, что по таким важнейшим техническим характеристикам, как масса, объем, энергопотребление и необходимые трудозатраты экипажа, БТСЖО существенно уступают системам, построенным исклю-

чительно на базе физико-химических процессов. Так, по оценкам, выполненным в 1988 г. инженером В.И.Корсаковым в Научно-производственном объединении “Энергия”, для орбитальной околоземной космической станции начальная масса для БТСЖО составила около 23 т, а для ФХ СЖО – 4,5 т, электропотребление – 36 кВт и 3,5 кВт соответственно; трудозатраты – 11 чел-ч/сут и 4 чел-ч/сут. Расчеты показали, что преимущество БТСЖО перед ФХСЖО по массе накапливается лишь с увеличением срока автономного функционирования, в основном за счет уменьшения потребного запаса пищи для экипажа. Однако оценка так называемого времени окупаемости системы, т.е. времени, за которое суммарное количество пищи, произведенной в БСЖО, превысит приведенную (рассчитанную с учетом энергопотребления и трудозатрат на обслуживание) массу оборудования для его производства, при существующем на конец 60-х гг. уровне растениеводства дала значение более 5 лет. В связи с этим было даже высказано сомнение в целесообразности продолжения разработок БТСЖО. Сомнения были обусловлены такими недостатками этих систем, как сравнительно низкие коэффициенты преобразования энергии, высокая трудоемкость переработки урожая, трудность оценки надежности биологических звеньев, трудность автоматизации технологии растениеводства и животноводства. Однако в пользу дальнейшего продолжения разработок БТСЖО также имелись веские соображения, а именно:

- улучшение среды обитания экипажей, обеспечиваемое биологическими объектами в БТСЖО, может стать решающим фактором поддержания работоспособности экипажей при увеличении длительности пилотируемых космических полетов;

- характеристики БТСЖО существенным образом зависят от прогресса технологии в растениеводстве и животноводстве, а также от технического совершенства применяемого оборудования и, следовательно, будут улучшаться со временем;

- характеристики БТСЖО на лунных и планетных станциях могут быть улучшены за счет использования местных природных ресурсов и энергии;

- и, наконец, в случае значительного увеличения дальности автономных пилотируемых космических экспедиций БТСЖО станут просто безальтернативными с точки зрения обеспечения экипажа пищей, поскольку масса необходимых для дальних полетов запасов пищи и сроки ее хранения станут практически неприемлемыми.

Многочисленные попытки искусственного синтеза пищевых продуктов из неорганики хотя и привели к некоторым положительным промежуточным результатам, в целом показали, что вряд ли можно надеяться в обозримом будущем на производство полноценной пищи из



отходов жизнедеятельности искусственным путем. Таким образом, в настоящее время единственным реальным путем снижения массы запасов пищи для экипажей на борту КЛА остается биосинтез пищевых веществ в БТСЖО.

Результаты многочисленных исследований, накопленные за последние три десятилетия, позволяют сделать вывод, что доводы сторонников продолжения разработок БТСЖО получили серьезную экспериментальную поддержку.

Следует отметить, что в современной научной литературе нет единого общепринятого термина для обозначения устройств для культивирования высших растений в космических объектах. В отечественных источниках такие устройства часто называют "космическими оранжереями" или "космическими вегетационными установками", в то время как американские специалисты применяют термины: "plant growth units", "biomass production systems" или "crop production chambers" и др. В данной работе мы будем придерживаться отечественных терминов.

В табл. В.1 приведены оценки проф. Ф.Солсбери из Университета штата Юта, США (Salisbury, 1990) для необходимой посадочной площади и потребляемой электроэнергии в космической оранжерее, обеспечивающих регенерацию растительной части пищевого рациона в составе БТСЖО в расчете на одного человека. Приведенные данные показывают, что размеры космической оранжереи, а следовательно, и ее масса, зависят приблизительно обратно пропорционально от урожайности основной углеводной культуры в составе многовидового посева в ЗВР (звене высших растений) БТСЖО, например от зерновой продуктивности пшеницы, занимающей во многих предлагаемых вариантах видовой структуры около 80 % посадочной площади (Березовский и др., 1997).

Таблица В.1

Зависимость размеров и энергопотребления звена высших растений БТСЖО от освещения и зерновой продуктивности пшеницы (Salisbury, 1990)

Поток фотонов ФАР, падающий на посев, моль/м <sup>2</sup> ·сут	Зерновая продуктивность, г/(м <sup>2</sup> ·сут)	Посадочная площадь ЗВР на одного человека, м <sup>2</sup>	Потребляемая мощность, кВт/чел.
32	18	43	10,3
86	41	19	11,4
144	60	13	15,6

Рассмотрим, как прогрессировали показатели зерновой продуктивности пшеницы за последние десятилетия. В 70-е годы в фитотроне красноярского Института биофизики был получен рекорд зерновой продуктивности пшеницы, который составил 21,9 г/(м<sup>2</sup>·сут) (Salisbury et al., 1997). Для сравнения укажем, что мировой рекорд зерновой продуктивности в полевых условиях в то время не превышал 10 г/м<sup>2</sup>·сут, а в 1990-е годы составлял около 14 г/м<sup>2</sup>·сут (Salisbury, 1995). В конце 1980-х годов в фитотроне уже была достигнута зерновая продуктивность, равная 60 г/(м<sup>2</sup>·сут) (Salisbury, Bugbee, 1988), а в 1990-е годы появилось сообщение доктора Д.Бубенкейма из Эймского центра НАСА о том, что в фитотроне его конструкции была достигнута зерновая продуктивность пшеницы, равная 65,5 г/(м<sup>2</sup>·сут) (Bubenheim, 1991). Таким образом, за 20 лет продуктивность пшеницы была повышена более чем втрое. При достигнутой рекордной продуктивности величина посадочной площади пшеницы, необходимой для одного члена экипажа в БСЖО, также может быть снижена примерно в три раза по сравнению с оценкой 1980-х годов, т.е. может составить сегодня менее 10 м<sup>2</sup>. Существуют пути дальнейшего увеличения урожайности посевов пшеницы в условиях искусственной среды (совершенствование видов методами геной инженерии и традиционной селекции, адаптивная оптимизация условий культивирования в процессе онтогенеза растений, применение самораздвигающейся структуры посева и др.).

На рис. В.2 представлены графики потребной для звена высших растений БТСЖО энергии, посадочной площади, КПД фотосинтеза посева и урожая зерна в случае выращивания монокультуры пшеницы в зависимости от падающей на посев фотосинтетически активной радиации, взятые из работы (Salisbury et al., 2002). Данные свидетельствуют о резком снижении размеров оранжереи по мере интенсификации освещения растений.

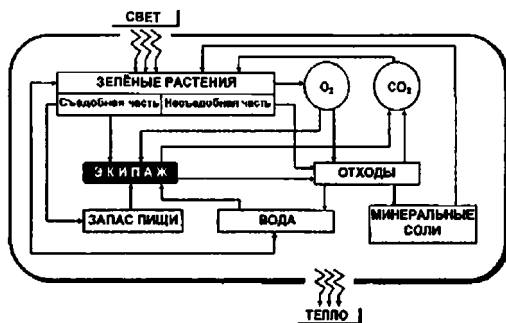


Рис. В.1. Схема системы жизнеобеспечения на основе фотосинтезирующих растений

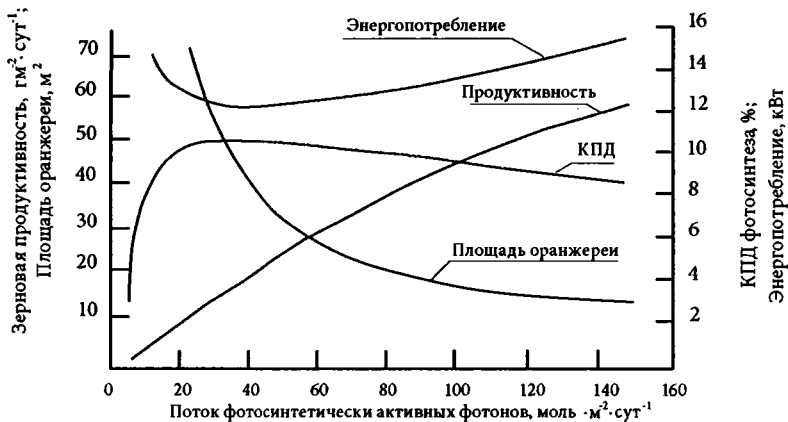


Рис. В.2. Характеристики звена высших растений БТСЖО с посевом пшеницы при оптимальных условиях выращивания в зависимости от интенсивности освещения

Вместе с тем сравнительные оценки характеристик БТСЖО и СЖО, основанных только на физико-химических процессах регенерации воды и воздуха (например, за счет реакций Сабатье и Боша) свидетельствуют о том, что в экспедициях длительностью менее 1,5 лет БТСЖО по приведенной массе уступают чисто техническим системам. На рис. В.3, взятом из работы (Drysdale et al., 1992), показано изменение приведенной массы различных СЖО для 4 человек на лунной базе от продолжительности функционирования. Несколько меньшее значение суммарного времени окупаемости БТСЖО (около 1 года) приводится в работе Bartsev et al., 1997а), однако в этих расчетах не учитывали массу конструкции вспомогательных систем в оранжерее. Как известно, стоимость выведения 1 кг полезного груза на околоземную орбиту оценивали в 1990-е годы суммой 10000 долларов (Salisbury, 1990), а выведения на поверхность Луны – примерно 30000 долларов (Drysdale et al., 1992). Приведенные данные показывают, что одним из важнейших условий для внедрения в практику космонавтики БТСЖО и, в частности, устройств для культивирования высших растений в космосе является минимизация их приведенной массы или стоимости. Возможности существенного снижения приведенной массы БТСЖО связаны с прямым использованием солнечного света для освещения фотоавтотрофов, без промежуточного преобразования ее в электричество для питания светильни-

ков. По данным Nakamura et al. (1999), переход на прямое солнечное освещение может повысить эффективность системы освещения в космической оранжерее в 10 раз. Большие перспективы снижения массы БТСЖО на планетарных базах связаны также с возможным наличием воды, грунта и некоторых биогенных элементов для культивирования растений на Луне и Марсе.

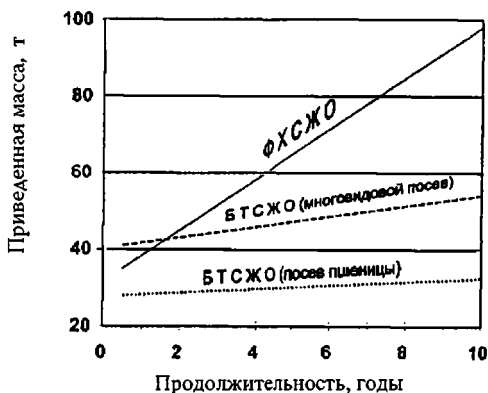


Рис. В 3. Зависимость приведенной массы различных СЖО для 4 человек на лунной базе от продолжительности функционирования

В целом, за последние десятилетия наблюдалось резкое снижение оценок стоимости космических разработок за счет внедрения компьютерного проектирования, улучшенного менеджмента и прогресса в технологиях. Так, по сообщениям специалистов НАСА, стоимость пилотируемой экспедиции на Марс в 1980-е годы оценивалась приблизительно в 450 млрд. американских долларов. Некоторые современные оценки стоимости такой экспедиции составляют менее 20 млрд. долларов. Аналогичные тенденции в области разработок звена выших растений могут существенно ускорить внедрение БТСЖО в практику космонавтики. Сегодня называют сроки первой пилотируемой экспедиции к Марсу в промежутке от 2014 до 2018 г. Специалисты НАСА разработали прогнозы внедрения различных типов БТСЖО в сценариях предстоящих лунных и марсианских экспедиций по результатам сопоставления расчетов приведенной массы (Drysdale, 1996). Эти результаты представлены нами в табл. В.2.

Приведенные данные в целом свидетельствуют о перспективности и актуальности разработок в области БТСЖО.

В силу кардинальных отличий среды обитания растений, существующей в космических оранжереях, от наземной среды обычные методы агротехники и известные вегетационные устройства, как правило, не могут быть использованы для космического растениеводства без существенной переработки. Однако эффективное культивирование растений в условиях космической оранжереи не может быть реализовано без дополнительных данных о воздействии тех или иных факторов космического полета на организм растения и без соответствующей коррекции среды обитания. Таким образом, непременным условием создания звена высших растений космических БТСЖО является проведение предварительных полетных экспериментов с растениями в специальных вегетационных устройствах, включающих систему жизнеобеспечения растений, т.е. в исследовательских космических оранжереях.

Таблица В.2

Характеристики БСЖО для различных сценариев космических экспедиций

(A.Drysdale, 1996)

Сценарии	Кол-во членов экипажа	Длительность экспедиции, сут	Рекомендуемые структуры БТСЖО
1. Изучение Луны (краткосрочная экспедиция)	до 4	до 60	Витаминная оранжерея ("Салатная машина") для улучшения среды обитания; исследовательская оранжерея для испытания посевов различных растений на Луне
2. Изучение Марса (краткосрочная экспедиция)	до 6	200 до планеты; от 30 до 90 на поверхности; 300 возвращение	БТСЖО для космического корабля с солнечным светом на 620 дней работы; "Салатная машина" в жилище на поверхности Марса; исследовательская оранжерея для испытания посевов растений на Марсе
3. Изучение Луны (длительное пребывание)	до 30	180 челночные экспедиции	БТСЖО для лунной базы с использованием естественного света и полной автоматизации управления
4. Изучение Марса (длительное пребывание)	до 12	200 до планеты; от 450 до 600 на поверхности; 300 возвращение	БТСЖО для космического корабля и БТСЖО для лунной базы; "Салатная машина" для лунной базы; исследовательская оранжерея для испытания посевов растений на Марсе

На первых этапах космических исследований с высшими растениями на советских орбитальных станциях и комплексах “Салют” и “Мир”, а также на американских космических кораблях был спроектирован и использован целый ряд устройств для выращивания растений в условиях микрогравитации, описанных, например, в работах (Машинский и др., 1976, 1988; Lork, 1988; Nechitailo, Mashinsky, 1993; Berkovich, 1996). Необходимо отметить большую роль российских ученых в создании конструкций первых космических оранжерей; среди них можно назвать В.Г.Чучкина, А.Л.Машинского, Ю.Н.Липова, Н.Д.Келлера, В.Н.Головина и др. Однако, несмотря на огромное значение, которое сыграли многие из этих установок для получения первичной информации о влиянии факторов космического полета на растения, точность и воспроизводимость полученных в них результатов в целом оказались невысокими. Наиболее вероятным источником различий в показателях роста и развития растений в полетных опытах 1960-1980-х годов исследователи считали высокую вариабельность параметров среды обитания из-за отсутствия надежных средств управления в космических оранжереях первых поколений (Лауринавичус и др., 1984; Парфенов, 1988). Главными причинами несовершенства первых космических вегетационных установок было отсутствие информации о степени воздействия различных факторов космического полета на растения и их среду обитания, а также крайняя ограниченность энергетических ресурсов на борту первых космических кораблей, затрудняющая совершенствование аппаратуры. Тем не менее многочисленные полетные и наземные эксперименты с растениями, проведенные к середине 1980-х годов, в основном, советскими учеными, позволили установить, что некоторые виды высших растений могут проходить полный цикл или большую часть онтогенеза в условиях космического полета на орбитальной станции, т.е. при микрогравитации (Меркис и Лауринавичус, 1983, Merkys, 1990; Ivanova et al., 1992, 1993).

Данные, накопленные в процессе космических экспериментов по культивированию растений в различных вегетационных устройствах, а также увеличение возможностей энергетической установки советского орбитального комплекса “Мир” позволили в 1984 г. поставить задачу создания новой, более мощной и совершенной исследовательской космической оранжереи “Свет”. Разработка конструкции этой оранжереи проводилась в 1980-е годы по инициативе ученых из Болгарии в рамках программы “Интеркосмос” совместными усилиями специалистов Института медико-биологических проблем (ИМБП) Минздрава СССР, а также инженеров из Института космических исследований (ИКИ) Болгарской АН. Основными авторами оранжереи “Свет” с российской стороны являлись сотрудники ИМБП: Ю.А.Беркович, В.М.Симонов, Ю.И.Шайдоров и О.М.Стругов, а с болгарской – сотрудники ИКИ

Т.Н.Иванова, П.П.Костов и Н.Кынчев. Оригинальность технических решений, положенных в основу конструкции оранжереи "Свет", была подтверждена авторскими свидетельствами (Беркович и др., 1986, 1988). В изготовлении и испытаниях оранжереи участвовал большой коллектив российских и болгарских специалистов. В 1989 г. оранжерея "Свет" была доставлена на борт ОС "Мир", а в начале 1990 г. в ней был проведен первый эксперимент с растениями редиса и листовой капусты. Принципы, заложенные в конструкцию космической оранжереи "Свет", оказались весьма прогрессивными для своего времени. Вследствие этого оранжерея после некоторой модернизации продолжала работать в космосе в течение 10 лет, до конца существования орбитального комплекса "Мир", обеспечивая получение важной научной информации. Создатели новой американо-российской космической оранжереи "Лада", работающей в настоящее время на Российском сегменте Международной космической станции, отмечали, что они использовали, в основном, те же конструктивные решения и технологию, что была разработана для оранжереи "Свет" (Bingham G.E. et al., 2002). В первых полетных опытах с растениями в оранжерее "Свет" впервые была доказана возможность процесса образования корнеплодов у редиса (Ivanova et al., 1992, 1993) и получена важная информация о функционировании технических систем, особенно в области увлажнения капиллярно-пористого почвозаменителя в условиях микрогравитации (Berkovich et al., 1991, Podolskiy et al., 1991). Более поздние опыты в оранжерее "Свет" (1996–2000 гг.) проводились совместно российскими и американскими учеными (Сычев и др., 2002). С российской стороны в эти годы программу исследований возглавлял д.б.н. В.Н.Сычев из ИМБП, а с американской – д-р Гэйл Бингем из Университета штата Юта. Авторы данной монографии в эти годы переключились на разработку производственных салатных оранжерей. Эксперименты в оранжерее "Свет" позволили впервые получить целый ряд важных результатов в области космического растениеводства. В частности, была показана возможность прохождения онтогенеза редиса и пшеницы в нормальные для земных растений сроки (Berkovich, 1991; Левинских и др., 1999). Показано ингибирующее влияние газообразного загрязнителя воздуха этилена в газовой среде ОС "Мир" на рост и развитие растений суперкарликовой пшеницы (Campbell et al., 2001). Впервые в космосе были проведены 2 последовательные вегетации и получены жизнеспособные семена гибрида листовой горчицы, а также пшеницы (Сычев и др., 2000, 2002), что доказало возможность воспроизводства семян растений в дальних космических полетах. Опыт, полученный в процессе работы оранжереи "Свет", позволил также осмыслить ряд проблем в технологии культивирования высших растений в условиях космического полета, что послу-

жило основой для совершенствования конструкции и алгоритмов управления основных узлов и систем космических оранжерей.

В целом, оранжерея "Свет" оказалась первой в мире вегетационной установкой, способной обеспечивать длительное и контролируемое выращивание растений в условиях космического полета, что и обусловило ее важную роль в космических исследованиях с растениями. Более детальные данные об оранжерее "Свет" будут приведены в главе 4.

При всех достоинствах, конструкция оранжереи "Свет" не была предназначена для регулярного производства растительной биомассы для рациона питания космонавтов. В 1994 г. в РКК "Энергия" было принято техническое решение о разработке космической овощной конвейерной оранжереи (КОКОР) "ВИТАЦИКЛ" для снабжения экипажа космонавтов Международной космической станции свежей витаминной зеленью в качестве добавки к пищевому рациону. Заданная проектная производительность КОКОР составила 150 г свежей зеленой биомассы в сутки, что было в несколько раз выше, чем у любой из известных космических оранжерей. Впоследствии эту оранжерею стали называть салатной машиной. В 1994 г. работы по созданию КОКОР были начаты в ГНЦ РФ – ИМБП под руководством д.т.н. Ю.А.Берковича в кооперации с рядом организаций ракетно-космического комплекса. Это была первая в мире реальная попытка создать оранжерею, специально предназначенную для воспроизводства хотя бы небольшой части рациона питания экипажей в условиях космического полета. Жесткие ограничения на объемно-весовые и энергетические характеристики оранжереи со стороны бортовых систем не давали возможности использовать конструктивные решения, найденные в свое время для оранжереи "Свет". Вследствие этого разработчикам пришлось изыскать совершенно новые компоновочные подходы и разработать другие методики оптимизации конструктивной схемы и режимов работы основных узлов оранжереи. Был разработан новый класс вегетационных устройств с самораздвигающимися посевами растений на выпуклых посадочных поверхностях. Особенности и преимущества оранжерей этого класса будут описаны нами в главах 4 и 5. Была разработана для космической салатной оранжереи и новая система снабжения корней растений минеральными элементами, водой и кислородом, которая будет описана нами в главе 6. Новизна разработанных в процессе этой работы устройств и способов была подтверждена в 12 авторских свидетельствах и патентах, список которых приведен в конце книги после списка цитируемой литературы.

В 2002 г. Международный научно-технический центр (МНТЦ) – организация, спонсирующая важные для международного научного сообщества разработки в странах СНГ, под-



держал наши разработки аппаратуры и технологии для создания космической салатной оранжереи в рамках Проекта № 2137. Авторы выражают искреннюю благодарность МНТЦ за поддержку, благодаря которой появилась возможность издания и этой монографии.

Кроме того, авторы выражают большую благодарность тем из своих коллег, кто оказывал нам консультации или предоставлял по нашей просьбе справки по многочисленным частным вопросам, затронутым в данной книге. Среди них – д.т.н. проф. Ю.Е.Синяк, д.б.н. проф. В.Б.Иванов, д.т.н. В.В.Цетлин, к.ф.-м.н. В.П.Дроняев, к.ф.-м.н. Ю.Г.Паниткиш и многие другие.

Насколько нам известно, эта книга является первой монографией в области проектирования космических оранжерей, поэтому авторы постарались отразить в ней разработанный ими системный подход к проектированию космических оранжерей различного назначения, а также научно-практические результаты работы в этой области начиная с 1979 г. и по настоящее время. Кроме того, в монографии зафиксировано современное состояние разработок устройств для выращивания растений в условиях космического полета в странах, ведущих космические исследования. Очень кратко мы осветили также новейшую историю развития космического растениеводства для целей жизнеобеспечения экипажей пилотируемых космических кораблей и дали обзор современных достижений в этой области. В книге изложены и некоторые прогнозы авторов о конструкциях космических оранжерей ближайшего будущего. Приложен довольно широкий список публикаций по затронутым вопросам.

Авторы надеются, что монография будет полезна специалистам и студентам соответствующих специальностей, а также всем, кто интересуется методами и проблемами выращивания растений в столь экзотических условиях, как среда обитания в пилотируемом космическом корабле.

# ГЛАВА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ КОСМИЧЕСКИХ ОРАНЖЕРЕЙ

## 1.1. Классификация современных космических оранжерей

Еще в начале XX века в работах К.Э.Цюлковского (1986а; 1986б) были сформулированы некоторые принципы построения космических оранжерей для биорегенеративных систем жизнеобеспечения людей в космических кораблях: использование солнечного излучения в качестве внешнего источника энергии (была предложена, например, коническая компоновка оранжерей для этого случая), балансировка потоков потребления и выделения веществ между автотрофными и гетеротрофными организмами, применение многовидовой структуры биологических компонентов системы, расположение космических оранжерей вне обитаемых отсеков космических летательных аппаратов.

Предпосылками для нового, практического этапа работ в области культивирования растений для космических систем жизнеобеспечения (СЖО) послужило, с одной стороны, появление пилотируемой космонавтики, а с другой — интенсивное развитие методов и технологий для промышленного растениеводства (защищенный грунт, гидропоника, агрегатопоника и аэропоника, светокультура, средства автоматического мониторинга состава питательных растворов для растений и др.), которые позволили получить информацию о потребностях растений в искусственной среде обитания. С наступлением космической эры высшие растения стали одним из излюбленных объектов изучения в космической биологии. Перечень экспериментов с растениями и описание некоторых конструкций первых исследовательских оранжерей на советских космических кораблях уже опубликованы (Nechitailo, Mashinsky, 1993; Дубинин и др., 1984), поэтому мы лишь дополним анализ конструктивных особенностей научно-исследовательских космических оранжерей по мере усложнения исследовательских задач. Современные проекты космических оранжерей для различных космических объектов целесообразно подразделить на 2 класса, соответственно основному условию их применения, оказывающему решающее влияние на конструкцию оранжерей и технологию культивирования в них растений:

- для условий гравитации (наземной или измененной по сравнению с земной, например, на лунных и планетарных базах);
- для условий невесомости (или микрогравитации), т.е. для орбитальных станций и межпланетных кораблей.

Внутри каждого из этих классов космические оранжереи подразделяют по их функциональному назначению, которое также в значительной степени определяет

конструктивные параметры оранжерей. Например, согласно классификации исследователей В.Г.Чучкина и В.Н. Головина, ИМБП, можно выделить 5 функциональных типов оранжерей (Чучкин и др., 1983):

- научно-исследовательские, предназначенные для изучения особенностей роста и развития растений в условиях космического полета;
- декоративные, в которых растения культивируют с целью оказания психофизиологической поддержки экипажу космического корабля;
- зеленные, или витаминные, предназначенные для производства салатных и пряно-вкусовых овощных культур с целью обогащения рациона питания космонавтов;
- пищевые, производящие растительную часть рациона питания экипажа (целиком или в значительной ее доле);
- кормовые, предназначенные для производства растительного корма для животных, включенных в гетеротрофное звено биорегенеративных систем жизнеобеспечения.

Последние 3 типа оранжерей будем называть производственными, т.к. их основным назначением является производство биомассы растительного происхождения. Очевидно, что могут существовать космические оранжереи комбинированного назначения, например пищевые и кормовые или зеленные и декоративные одновременно.

После первого космического полета Ю.А. Гагарина в СССР были развернуты работы как в области создания наземных физических моделей систем жизнеобеспечения экипажей в гермокабинах, включающих пищевые и кормовые оранжереи с высшими растениями, так и в области разработки научно-исследовательских и декоративных вегетационных устройств для культивирования растений в условиях микрогравитации непосредственно на орбитальных космических кораблях и станциях. Эти работы проводились в основном в Москве, сначала в Институте авиационной и космической медицины, а затем в Институте медико-биологических проблем (ИМБП) Минздрава СССР, а также во Всесоюзном институте сельскохозяйственного машиностроения и во Всесоюзном научно-исследовательском биотехническом институте Главмикробиопрома СССР (ВНИИ биотехника). Кроме того, работы по этой тематике проводили в Красноярске, в Институте биофизики (ИБФ) Сибирского отделения АН, в Ленинградском агрофизическом институте и в Институте физико-органической химии Белорусской АН в г. Минске. В 80-е годы появились сообщения об американских и европейских разработках исследовательских оранжерей, предназначенных в основном для космических кораблей многоцветного пользования "Шаттл", а затем и для Международной космической станции (МКС). В 1990-е годы и до настоящего времени в НАСА стали поддерживать проекты по разработке производственных космических оранжерей для МКС и перспективных космических экспедиций (Teixeira et al.,

1999; Barta, Henderson, 1998; Hoehn et al., 1997). Ниже дан краткий обзор известных конструкций космических оранжерей по данным, опубликованным в научной литературе до 2004 г.

## 1.2. Пищевые оранжереи для наземных моделей

В начале 60-х годов в установке "Наземный лабораторный комплекс" (НЛК) в Институте авиационной и космической медицины в Москве был впервые разработан и реализован проект наземной биорегенеративной системы жизнеобеспечения. Позднее подобная установка с использованием высших растений была создана в ИМБП (посадочная площадь оранжереи 14,75 м<sup>2</sup>, объем оранжереи 69 м<sup>3</sup>). Пищевая оранжерея в составе этого комплекса представляла собой герметичную цилиндрическую камеру, соединенную через герметично закрывающуюся дверь с бытовым отсеком для экипажа, снабженную установкой кондиционирования воздуха, системами подачи питательного раствора, светообеспечения, распределения жидкостей, поддержания заданной концентрации углекислого газа в воздухе, компенсационно-дренажной системой и контрольно-измерительной аппаратурой. Растения освещались либо лампами накаливания с водяными и стеклянными фильтрами инфракрасного излучения, либо дуговыми натриевыми лампами. Суммарная установленная мощность ламп в оранжерее в 1980-е годы превышала 200 кВт, при этом облученность в области ФАР на уровне посадочной поверхности вегетационных ванн была увеличена с 50 Вт/м<sup>2</sup> в

Внутренний вид оранжереи НЛК

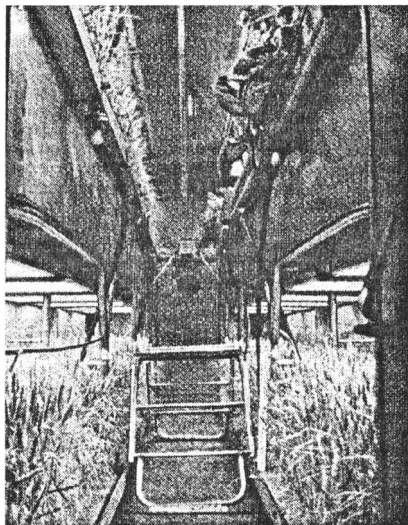


Рис. 1.1

Общий вид установки "БИОС-3"

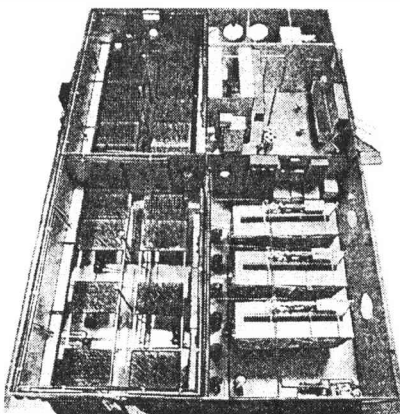


Рис. 1.2

1960-е гг. до  $210 \text{ Вт/м}^2$  — в 1980-е гг. В первых экспериментах растения в НЛК выращивали гидропонным методом на керамзите, в более поздних — субиригационным бессубстратным методом в ваннах из нержавеющей стали, расположенных в один, а затем в два яруса с проходом посередине. Внутренний вид оранжереи представлен на рис. 1.1, взятом из работы (Мелешко и Шепелев, 1994). В 1967-1968 гг. в оранжерее НЛК был проведен первый в мире годовой эксперимент с изоляцией экипажа из 3 человек в гермообъеме с регенерируемой средой обитания, а затем ряд более коротких экспериментов с различными моделями биорегенеративных систем жизнеобеспечения (Адамович и Горшенин, 1997; Мановцев, 1997; Мелешко и Шепелев, 1994; Шепелев, 1975).

В 1968 г. в красноярском Институте биофизики СО АН СССР был введен в эксплуатацию экспериментальный комплекс “Биос-3”, планировка которого представлена нами на рис. 1.2, взятом из работы Гительсона и др. (1975). “Биос-3” представлял собой герметичную камеру в форме прямоугольного параллелепипеда с длиной и шириной по  $14,9 \text{ м}^2$  и высотой  $2,5 \text{ м}^2$ , разделенную на 4 равных герметизированных отсека. 2 отсека с объемом около  $79 \text{ м}^3$  каждый были отведены под оранжерею с суммарной посадочной площадью около  $41 \text{ м}^2$ . Источниками света служили дуговые ксеноновые лампы, суммарная установленная мощность которых составляла  $240 \text{ кВт}$ , а плотность потока ФАР от ламп достигала  $300 \text{ Вт/м}^2$ . Эти системы были успешно использованы для проведения наземных экспериментов с изоляцией экипажей в них сроком от месяца до года. Результаты этих опытов описаны в работах (Salisbury et al., 1997; Терсков и др., 1979; Гительсон и др., 1975).

В 80-е годы во ВНИИ биотехника был разработан проект 6-звенной БСЖО “Фрегат”, включающий подсистему высших растений, которая предназначалась для регенерации среды обитания экипажа из 6 человек с ограничением энергопотребления величиной  $20 \text{ кВт}$  (Морозов, Миронов, 1970). Хотя этот проект не был доведен до стадии комплексных испытаний, в процессе его разработки были получены важные оценки характеристик системы. В частности, эта биорегенеративная система жизнеобеспечения включала оранжерею объемом  $29 \text{ м}^3$  с энергопотреблением  $17,2 \text{ кВт}$ , которая должна была производить пищевую биомассу в количестве, обеспечивающем растительную часть пищевого рациона экипажа. В эти же годы к работам по созданию наземных биолого-технических систем жизнеобеспечения, включающих оранжереи с высшими растениями, активно подключились специалисты НАСА. По данным работ (Wheeler et al., 1996; Prince et al., 1987), в 1998 г. в Космическом центре им. Дж. Кеннеди (мыс Канаверел, Флорида, США) была построена и до 2002 г. использовалась в опытах по отработке технологии и измерению характеристик посевов высших растений установка ВРС (Biomass Production Chamber), общий вид которой и внутренняя планировка представлены на рис. 1.3 А и Б. Установка была переоборудована

из барокамеры и имела форму вертикального цилиндра с диаметром 3,6 м, высотой 7,3 м и объемом 113 м<sup>3</sup>. Растения выращивали различными гидропонными методами в посадочных ваннах, расположенных вплотную к внутренней поверхности цилиндра в 4 яруса. Суммарная посадочная площадь составляла 20 м<sup>2</sup>. В качестве основных источников света для растений использованы дуговые натриевые лампы высокого давления суммарной установочной мощностью более 50 кВт. Камера ВРС являлась в свое время основной стендовой базой NASA для отработки технологии культивирования высших растений в искусственных условиях. Среди исследуемых культур были: пшеница, картофель, томаты, арахис, соя, салат и ряд других.

Другая наземная модель космической оранжереи была построена NASA в 1995 г. в Космическом центре им. Джонсона (Хьюстон, Техас) в составе стендовой установки Regenerative Life Support Systems Test Bed (RLSSTB) (Tri, Henninger, 1995; Barta, Edeen, 1996). Установка предназначена для испытаний различных структур биолого-технических систем жизнеобеспечения человека и состоит из нескольких герметизируемых отсеков, включая оранжерею с изменяемым давлением газовой среды — Variable Pressure Growth Chamber (VPGC). Интерьер этой оранжереи представлен на рис. 1.4. Размеры оранжереи: длина 4,2 м, ширина 2,7 м и высота 2,4 м, объем около 27 м<sup>3</sup>. Суммарная посадочная площадь

Внешний (А) и внутренний (Б) вид оранжереи БТК  
 А Б

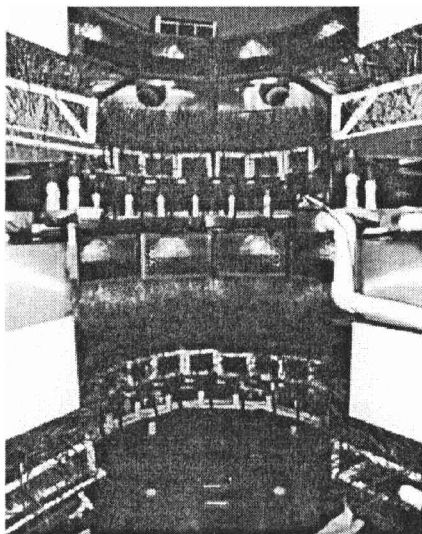
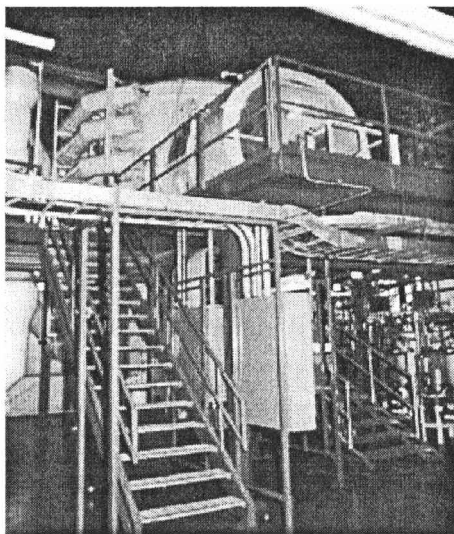


Рис. 1.3

## Интерьер оранжереи VPGC

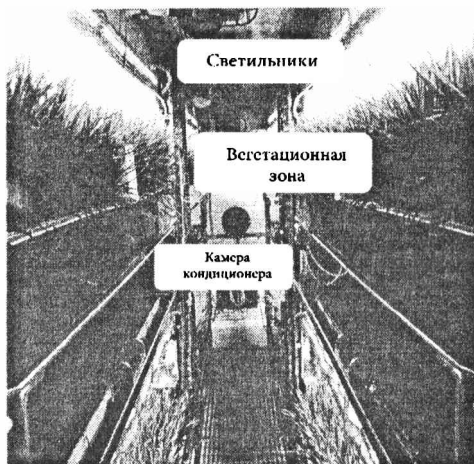


Рис. 1.4

вегетационных ванн в стеллажах составляет  $11,2 \text{ м}^2$ . Компоновка оранжереи VPGC напоминает оранжерею БТК в ИМБП (рис. 1.1). Оранжерея снабжена системами регулирования и мониторинга параметров среды растений и, в частности, может обеспечивать за счет дуговых натриевых ламп высокого давления поток фотосинтетически активных фотонов до  $1750 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2\text{с})$  (около  $440 \text{ Вт}/\text{м}^2$  ФАР). Суммарная установочная мощность светильников в оранжерее составляет около 40 кВт. К настоящему времени на установке RLSSTB проведены несколько опытов по замыканию газообмена человека и

растений пшеницы (Barta, Henderson, 1998).

В 1996 г. в НАСА была поставлена задача разработать в рамках программы "Перспективное жизнеобеспечение" (Advanced Life Support, ALS) биорегенеративную систему жизнеобеспечения (BIO-Plex) на основе комплекса биологических и физико-химических процессов (Tri, 1999; Wheeler, Strayer, 1997; Henninger, 1996). В перспективе американские исследователи предполагали реализовать в этом проекте полномасштабную биолого-техническую систему жизнеобеспечения с обеспечением производства 90 % пищевого рациона экипажа из 4 человек. В работе (Barta, 1996) приведен вариант предполагаемой посевной структуры оранжереи в составе биолого-технической системы жизнеобеспечения, включающий следующие культуры: томаты, морковь, капуста, шпинат, салат, редис, мангольд, лук, картофель, соя, бобы, арахис, рис. Проект оранжереи для такой регенеративной системы предусматривал ее размещение в герметичном стальном цилиндре диаметром 4,6 м и длиной 11,3 м, с объемом  $185 \text{ м}^3$ . На рис. 1.5 представлен один из вариантов размещения вегетационного оборудования в цилиндрическом оранжерейном модуле по проекту BIO-Plex. Суммарная площадь посадочных ванн в различных вариантах составляет от 80 до  $130 \text{ м}^2$ . Суммарная установленная мощность дуговых натриевых ламп высокого давления для освещения растений в этой оранжерее не менее  $300 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . В настоящее время установка проходит испытания в Космическом центре им. Джонсона НАСА (Barta, Castillo, 2001).

Вариант размещения вегетационного оборудования в оранжерее по проекту BIO-Plex

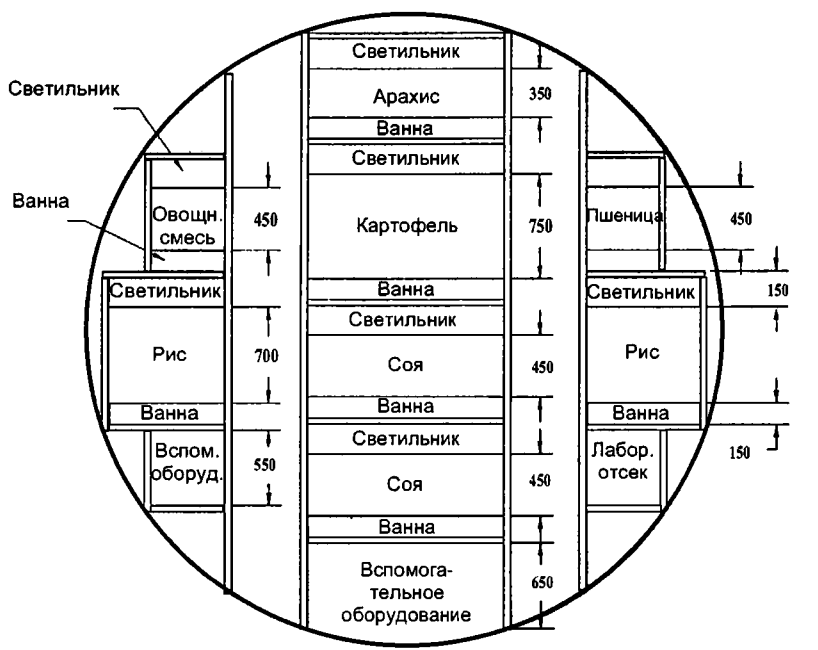


Рис. 1.5

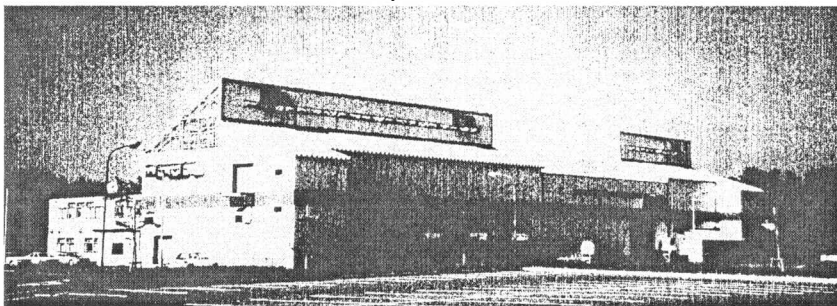
Начиная с конца 1980-х годов разработкой биологотехнических систем жизнеобеспечения занялись и японские ученые, в основном из Национальной аэрокосмической лаборатории в Токио (Nitta & Ohya, 1989; Nitta, 1987). С 1994 г. в Японии начали постройку и оборудование установки Closed Ecology Experiment Facilities (CEEF), для моделирования замкнутых систем жизнеобеспечения на лунной или марсианской базе, а также для моделирования наземных экологических процессов (Nitta, 1996). К 1997 г. было завершено создание оранжерейной части этой установки-Plantation Experiment Facility (PEF) (Nitta et al., 1998). Общий вид этой установки снаружи и внутри показан на рис. 1.6 А и Б. В отличие от вышеописанных установок оранжерея PEF обустроена в специальном здании. Она включает 3 изолированные камеры с искусственным освещением с посадочной площадью по 30 м<sup>2</sup> каждая и камеру площадью 60 м<sup>2</sup> с солнечным освещением растений.

В каждой камере установлено по 6 ванн для культивирования растений методами гидропоники на специальных пористых матах. В качестве искусственных источников освещения использованы дуговые натриевые лампы высокого давления с водяными фильтрами ИК радиации. Суммарная установочная мощность ламп составляет порядка 120



кВт. Все растительные камеры снабжены системами управления и мониторинга среды обитания растений. В последние годы в установке РЕФ проводится большой объем экспериментов с посевами растений различных видов (Тако et al., 2002). В настоящее время японские исследователи готовят 2-летний эксперимент в установке СЕЕФ с экипажем из 2 человек. В состав биолого-технической системы жизнеобеспечения намечается включить растения и двух коз (Nitta, 2004). В качестве новых культур в посевной структуре посева предполагается использовать рис и сою.

А – общий вид установки СЕЕФ



Б – Интерьер установки РЕФ



Рис. 1.6

В 1991 г. в штате Аризона США было завершено строительство самой масштабной и известной для широкой публики герметизированной обитаемой установки с биолого-технической системой жизнеобеспечения экипажа – “Биосферы-2” (Alling, Nelson, 1993;

Silverstone, Nelson, 1996; Nelson et al., 1993; Nelson et al., 1994; Никишин и Пановко, 1989). Общий вид этой установки изображен на рис. 1.7 А, а интерьер оранжереи Intensive Agricultural Biom (IAB) – на рис 1.7 Б. Фотографии взяты из работы (Alling et al., 1993). Общая площадь установки, покрытой сверху стеклянной крышей, а снизу отделенной от окружающего грунта стальной сварной пластиной, составляет около 1,28 га, объем более 164 тыс. м<sup>3</sup>. Эта площадь разделена на 7 биомов с различными климатическими режимами, почвами и растительностью: влажный тропический лес, саванна, пустыня, болото, океан, а также два антропогенных: человеческое жилище и сельскохозяйственный блок – IAB (Intensive Agricultural Biom). Последний был предназначен в основном для воспроизводства растительной пищи и, с этой точки зрения, мог бы считаться частью биолого-технической системы жизнеобеспечения экипажа. Площадь IAB составляла около 0,2 га, объем – около 35000 м<sup>3</sup>. В оранжерее культивировались более 80 зерновых, овощных и плодовых культур на почвенной смеси, содержащей прудовой, глинистый ил с добавками торфяного мха и компоста. Влажная почвенная смесь выполняла также роль фильтра для очистки воздуха и переработки отходов (Nelson et al, 1994). Растения в "Биосфере-2" выращивали при солнечном освещении за исключением небольшой (6-10 мкмоль/м<sup>2</sup>·с) подсветки в нижних ярусах посева на второй фазе эксперимента. В течение 2-годового эксперимента 1991-1993 гг. оранжерея IAB совместно с растениями других биомов "Биосферы-2" обеспечивала растительную часть рациона для каждого из 8 членов экипажа в среднем массой по 1942 г. в сутки с калорийностью 1682 ккал. Это составляло более 92 % от соответствующих показателей всего рациона. При этом, по данным работы Silverstone, Nelson (1996), трудозатраты на агротехнологию, обработку полученного урожая и уход за животными составляли около 45 % всего рабочего времени экипажа, несмотря на применение средств механизации труда. Интересно отметить, что рацион питания в опыте 1991–1993 гг. не обеспечивал стабилизации массы тела у членов экипажа: все они похудели в пределах от 9 до 22 % от первоначальной массы тела, что, однако, исследователи посчитали скорее полезным, чем вредным, для человеческого организма (Walford et al., 1992). Основную причину недостаточной производительности оранжереи авторы эксперимента связывали с пониженным уровнем инсоляции в течение опыта по сравнению со среднегодовым для данной местности в течение опыта. Между тем именно среднегодовой уровень падающей на биомы солнечной энергии был заложен при расчетах продуктивности фотоавтотрофного звена (Silverstone, Nelson, 1996). Тем не менее, по данным авторов, облученность растений в IAB достигала 400 мкмоль/м<sup>2</sup>·с, что для спектрального состава солнечного света соответствует приблизительно 90 Вт/м<sup>2</sup>. Для получения такой облученности с помощью,

например, экономичных дуговых натриевых ламп высокого давления потребовалась бы установочная электрическая мощность не менее 500 Вт/м<sup>2</sup>.

В целом, на основании вышеприведенного обзора существующих в мире оранжерей для биолого-технических систем жизнеобеспечения с регенерацией растительной пищи можно отметить их следующие особенности.

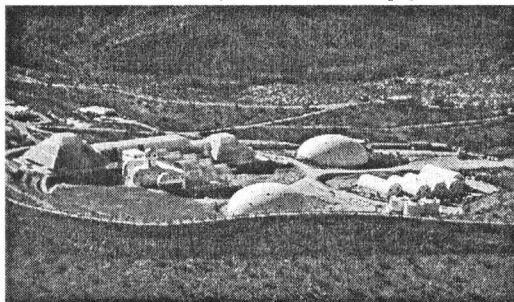
1. Оранжереи такого типа имеют габариты, объемы и энергопотребление, несовместимые с возможностями известных в настоящее время обитаемых космических объектов: орбитального комплекса (ОК) "Мир", Международной космической станции и космических кораблей "Шаттл", а также Марсианского транспортного корабля. Напомним, что энергопотребление самого крупного из сегментов МКС – российского – составляет 10,8 кВт, а свободный внутренний объем не превышает 78 м<sup>3</sup>.

2. Все оранжереи описанного типа используют наземные методы культивирования растений, которые не могут быть использованы непосредственно в условиях космического полета.

### 1.3. Исследовательские космические оранжереи для условий микрогравитации

Первые эксперименты на советских автоматических искусственных спутниках Земли типа "Космос", а затем и на ОК "Салют"–"Союз" проводились, как правило, с семенами или проростками растений и не требовали сложных устройств (Nechitailo, Mashinsky, 1993; Ильин и Парфенов, 1979; Дубинин и др., 1984; Lork, 1988; Seibert, 1987). Они представляли собой укладки с семенами, как, например, аппаратура "Биогравистат", или ББ-1–ББ-3, для экспонирования семян на борту в сухом или смоченном для проращивания состоянии во

А – общий вид установки «Биосфера-2»



Б – интерьер оранжереи ИАВ

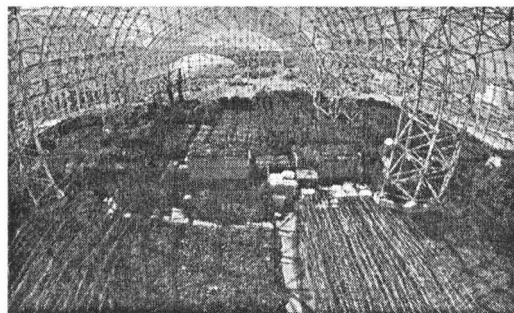


Рис. 1.7

вращающейся центрифуге или без нее. Отличительной чертой этих устройств было отсутствие в их составе источников света. Более сложные устройства для изучения вегетирующих растений, к которым можно отнести "Светоблок", "Светоблок М", "Вазон", "Фитон", "Фитон-2", "Оазис-1", "Оазис-1М", "Оазис-1АМ", "Лютик" и "Малахит", имели собственный светильник на основе люминесцентных ламп сначала мощностью 5 Вт, затем 8 Вт, а также устройства для ручного увлажнения. В качестве корневой среды использовали растворы агар-агара с удобрениями, а позже – гранулированные или волокнистые соленасыщенные ионообменные смолы. Основные характеристики ряда наиболее известных космических оранжерей, часть из которых была опубликована в работах (Berkovich, 1996; Scarascia-Mugnozza, Schettini, 2002), приведены в табл. 1.1.

Анализ изменения характеристик научно-исследовательских космических оранжерей по мере их модернизации обнаруживает 2 основные тенденции:

- увеличение посадочной площади, светового потока и связанного с этим энергопотребления оранжерей; исключением здесь служит оранжерея "ЛАДА", объем и энергопотребление которой примерно в 2 раза меньше по сравнению с предшествующей космической оранжереей "Свет", что связано с недостатком электроэнергии на российском сегменте МКС в начале 2000-х годов;
- совершенствование средств управления и контроля среды обитания растений.

Обе эти тенденции были вызваны потребностью в увеличении точности и воспроизводимости научных результатов в дорогостоящих космических экспериментах с растениями. Как было отмечено выше, сами исследователи, работавшие с растениями на первых орбитальных станциях и искусственных спутниках Земли, отмечали, что без тщательного мониторинга параметров среды обитания растений вряд ли можно делать обоснованные заключения о влиянии отдельных факторов космического полета (например, микрогравитации или газовых загрязнителей в кабине) на их рост и развитие. Поскольку многие виды растений являются более чувствительными, чем человек, по отношению к некоторым факторам космического полета, значения этих параметров в отсеках корабля, еще допустимые для человеческого организма, могут быть недопустимы для растений. Примером может служить случай, происшедший в полете на станции "Салют-6" в 1979 г., когда одновременно проводились 3 разных опыта: в двух установках "Вазон" культивировали тюльпан и каланхое, а в третьей, под названием "Лютик", велась выгонка 8 цветков тюльпанов. В один из дней полета все растения на борту были внезапно повреждены (потеряли тургор). В контрольных же растениях на земле все растения оставались в норме. Луковицы тюльпанов из установки "Лютик" впоследствии были доставлены на Землю и оказались жизнеспособными. Тщательные послеполетные исследования полученных

луковиц, проведенные в ИМБП В.Г.Чучкиным с сотрудниками при поочередном воздействии возможных неблагоприятных факторов предполетной подготовки и космического полета, а также анализ обстоятельств повреждения всех растений на борту позволили считать наиболее вероятной причиной воздействие на растения разовый выброс в газовую среду орбитальной станции неустановленного газообразного токсиканта. Этот случай заставил исследователей в дальнейшем разработать и установить на оранжереях “Светоблок-М” и “Фитон” мембранный фильтр летучих углеводородов. В дальнейшем устройства очистки воздуха от летучих загрязнителей стали неременной частью многих научно-исследовательских оранжерей. Другой пример связан с проблемой обеспечения благоприятного водно-воздушного режима в капиллярно-пористых корнеобитаемых средах (субстратах). Уже в 1971 г. в первом полетном опыте на космической оранжерее “Оазис-1” была зафиксированная крайне низкая всхожесть и замедленное развитие растений льна, креписа и капусты пекинской. В наземном же контроле были получены нормальные результаты. Послеполетный анализ доставленных на землю растений показал признаки переувлажнения корней в полете. Корневой модуль в оранжерее “Оазис-1” представлял собой сосуд с капиллярно-пористой вставкой для посадки растений и с пассивным подводом воды к ней за счет капиллярных сил из резервуара через комбинацию гидрофильных и гидрофобных нитей, обеспечивающую в наземных условиях оптимальную для растений влажность в корнеобитаемой зоне (Келлер и др., 1972). В описанном полетном опыте было впервые экспериментально зафиксировано, что движение воды в капиллярно-пористых средах в условиях микрогравитации может иметь существенные особенности. Регулирование водно-воздушного режима в корневых модулях космических оранжерей должно осуществляться по измененным по сравнению с наземными установками законам, поскольку в космическом полете отсутствует один из основных видов движения воды в почвах – гравитационный сток. Мы проанализируем подробнее современные модели движения воды в почвозаменителях применительно к космическим оранжереям в главе 3 книги. Конструкторам же оранжереи “Оазис-1” в дальнейшем пришлось разработать оригинальный автоматический регулятор давления в резервуаре КМ на основе комбинации гидрофильных и гидрофобных мембран (Головин и др., 1984), который впоследствии был испытан в оранжереях “Оазис-1” и “Лютик” в полетах на ОК “Салют-2” и “Салют-6”. Последующие специальные космические эксперименты “Субстрат” и “Экспериментальная кювета”, проведенные на ОК “Салют-7” (Ivanova, Kostov, 1986; Podolsky, Mashinsky, 1994; Mashinsky et al., 1994) для изучения особенностей передвижения воды в капиллярно-пористых средах в условиях микрогравитации, позволили выявить ряд дополнительных особенностей этого процесса по сравнению с наземным. Эти результаты были использованы при разработке

регулятора влажности субстрата с датчиком обратной связи в вегетационных сосудах космической оранжереи "Свет", что позволило лучше контролировать в полете этот важный параметр корнеобитаемой среды. Приведенные примеры иллюстрируют роль космических экспериментов в совершенствовании систем контроля увлажнения и аэрации корневой зоны растений для научно-исследовательских космических оранжерей.

Другим средством, расширяющим экспериментальные возможности и повышающим надежность результатов полетных опытов с растениями, является увеличение посадочной площади, уровня облученности и связанной с этими параметрами мощности энергопотребления. Первые оранжереи типа "Оазис-1", "Вазон", "Светоблок", "Фитон" потребляли электрическую мощность не более 10–15 Вт, обеспечивая облученность растений ФАР не более 10–20 Вт/м<sup>2</sup> на площади до 200 см<sup>2</sup>. При такой облученности можно было культивировать, например, ювенильные растения в непродолжительных опытах (до 2-3 недель) с кукурузой, горохом, пшеницей. В этих опытах проростки получали основное питание за счет запасов в семени. В ряде коротких опытов в оранжереях выращивали выгоночные культуры: лук, тюльпаны и другие цветочные растения, в которых питание в основном было запасено в луковице. Иногда использовали теневыносливые растения с невысоким уровнем фотосинтеза (в опытах с арабидопсисом, креписом, льном и др.). При попытках же длительного выращивания других посевов в растениях обнаруживались отклонения в развитии, связанные с недостатком освещения или неадекватными условиями в корнеобитаемой зоне. Примером может служить опыт по проведению полной вегетации растений пшеницы на ОК "Мир" в установке "Светоблок-М" (Mashinsky et al., 1994). По данным работы (Сычев и др., 2000), в этом опыте растения пшеницы не достигли стадии спелости даже за 157 суток полета. Малые размеры посадочной площади в этой оранжерее (50 см<sup>2</sup>) позволяли вести вегетацию лишь трех растений, из которых лишь одно удалось довести до стадии спелости после наземного доращивания. Очевидно, что достоверность выводов по результатам такого опыта была бы намного выше при более высоком уровне освещения и большей посадочной площади, что потребовало бы более совершенной системы водоснабжения. Приемлемые для надежного проведения полной вегетации пшеницы условия были впервые реализованы в оранжерее "Свет-2", где облученность растений в области фотосинтетически активной радиации (ФАР) была повышена почти до 80 Вт/м<sup>2</sup> (около 350 мкмоль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>), а посадочная площадь составляла 0,09 м<sup>2</sup>, что позволяло получать синхронно посев из 80 растений пшеницы (Levinskikh et al., 1997; Левинских и др., 1999; Сычев и др., 2002). Как следует из табл. 1.1, российско-болгарская оранжерея "Свет" имела максимальную для своего времени посадочную площадь среди всех использовавшихся в полетных экспериментах научно-исследовательских космических оранжерей.

Основные характеристики ряда научно-исследовательских и декоративных космических оранжерей

№ п/п	Название, изготовитель	Посад. пл., см <sup>2</sup>	Облущ. растений в области ФАР, Вт/м <sup>2</sup>	Управляемые параметры	Мониторинг среды	Корнеобитаемая среда	Первое использование в КП, дата, лит.источники
1	2	3	4	5	6	7	8
1	"Оазис-1". ИМБП, ВИСХОМ, НПО "ЭНЕРГИЯ" (Москва); АСКБ (Ленинград), Россия	(8) x 13	9-10	Ручной полив растений по программе	Температура воздуха; кинсьемка	Соленасыщенный ионообменник «Биона-В»	"Салют", 1971 (Nechitailo, Mashinsky, 1993)
2	"Фитон-2". Институт ботаники АН Лит. ССР (Вильнюс)	(5) x 40	9-10	-	-	Гель (раствор агар-агара с нутриентами)	"Салют-6" 1978 г. (Nechitailo, Mashinsky, 1993)
3	"Люттик" ИМБП, Россия	200	9-10	Влажность субстрата (автоматически)	-	Инертный перлит	"Салют-6" 1979 г. (Nechitailo, Mashinsky, 1993)
4	"Оазис-1М, -1АМ", ВИСХОМ, ВНИИ биотехника НПО "ЭНЕРГИЯ", Россия	200	9-10	Ручной полив по программе	Регистрация объема поливной воды; температура воздуха; кинсьемка	«Биона» В+удобрения	"Салют-4", 1974 г.; "Салют-6", 1979 г. (Nechitailo, Mashinsky, 1993)

1	2	3	4	5	6	7	8
5	"Оазис-3". ИМБП (Москва); ВНИИГД (Донецк), СССР	700	15-20	Влажность субстрата (автоматически)	-	Инертный перлит	ИСЗ "Космос- 1129", 1979 г. (Адамович и Горшенин, 1997)
6	Светоблок-М" ВИСХОМ, НПО "ЭНЕРГИЯ", Россия; Институт ботаники АН Лит. ССР (Вильнюс)	50	9-10	Ручной полив растений по программе; Фильтрация летучих углеводородов	-	Гель (агар-агар с нутриентами)	"Салют-7", 1982 г. (Nechitailo, Mashinsky, 1993)
7	"Малахит" ВНИИ биотехники (Москва); Институт ботаники АН Лит. ССР (Вильнюс)	300	9-10	-	-	«Биона-В»	"Салют-6", 1980 г. (Nechitailo, Mashinsky, 1993)
8	PGU, Космический центр им. Кеннеди НАСА, США	(5) или (6) x 72	15	Температура; Светопериод; Фильтрация летучих углеводородов в воздухе	Температура воздуха	Гель с нутриентами	STS 3 1982 г. Krikorian & Levine, 1991; Powell et al., 1989)
9	"Оазис-А" ВИСХОМ, НПО "ЭНЕРГИЯ", Россия	400	30-40	Ручной полив по программе; Ручная вентиляция корневой зоны; температура воздуха	Регистрация температуры воздуха в 5 точках	«Биона- В»	"Салют-7", 1982 г. (Nechitailo, Mashinsky, 1993)



1	2	3	4	5	6	7	8
10	"Свет", ГНЦ ИМБП, Россия; ИКИ БАН, Болгария	2 x 450	30-50	Расход поливной воды; влажность субстрата; светопериод	Регистрация температуры воздуха в 5 точках и субстрата; влажность воздуха и субстрата; Расход поливной воды; фотосъемка; передача данных на Землю по ТМ каналу	«Балканин»	ОС "Мир" 1990 г. (Ivanova et al., 1990, 1992)
1	2	3	4	5	6	7	8
11	PGF Космический центр им. Кеннеди НАСА, США	(6) x 72	40-50	Температура и влажность воздуха; облученность; светопериод; концентр CO <sub>2</sub> ; Фильтрация летучих углеводородов	Регистрация управляемых параметров и скорости воздушных потоков	Гель (раствор агар-агара с нутриентами); арцелит	1995 г. Chapman et al.,1995)
12	PGBA, Эймский космический центр НАСА, Университет Колорадо (BioServe Space Technologies), США	550	50-60	Температура и влажность воздуха; облученность; светопериод; концентр CO <sub>2</sub> ; Фильтрация летучих углеводородов	Регистрация управляемых параметров	Гель (раствор агар-агара с нутриентами) или почва	STS 63 1995г. (Hoehn A. et al., 1997; Homer et al., 1997)

1	2	3	4	5	6	7	8
13	BIOMAUS, ЕКА, фирма DARA (Германия)	(6) x 25	40	Температура, влажность воздуха и корневой зоны; светопериод; Фильтрация летучих углеводородов, спектр источников света	Регистрация и хранение управляемых параметров; видеозапись	Гель (раствор агар-агара с нутриентами)	Планирова- лась к использова- нию на биоспутниках ЕКА (Klintworth, 1992)
14	"Свет-2", ИМБП, Россия, Ун-т штата Юта, США	(2) x 450	до 90	Скорость воздуха при вентиляции; температура, влажность субстрата, облученность; Фильтрация летучих углеводородов	Регистрация управляемых параметров, газообмена растений, транспирации; фотосъемка; передача данных на Землю по ТМ каналу	Соленасыщенный цеолит "Балканиц", "Турфейс <sup>ТМ</sup> " + удобрение "Осмокот"	"Мир", 1996. (Bingham et al., 1996)
15	ASTROCULTURE (ASC), Висконсинский центр по космической робототехнике, (WCSAR), г. Медисон, США	(2) x 100	До 110	Давление, температура и влажность воздуха, pCO <sub>2</sub> , Влажность субстрата, облученность, спектр источников; Фильтрация летучих углеводородов	Регистрация управляемых параметров; видеозапись	Пористые трубки в арцелите с удобрением "Осмокот"	STS - 89, 1998 г. (Duffie et al., 1995; Bula et al., 1992)

1	2	3	4	5	6	7	8
16	NPNE Космический центр им. Кеннеди НАСА, США	200	50-60	Температура и влажность воздуха и корневой зоны; светопериод; спектр ламп	Регистрация управляемых параметров; облученности; давления; видеозапись	Пористые трубки с питательным раствором	STS – 29, 1998г. (Piasuch et al, 1995)
17	PRU, Эймский центр и Космический центр им. Кеннеди НАСА, Локхид Мартин корп., Дайнамак корп., США	1040	До 150	Температура и влажность воздуха и корневой зоны; концентрация CO <sub>2</sub> и C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> в воздухе; светопериод; облученность; концентрация O <sub>2</sub> в субстратном растворе	Регистрация управляемых параметров; ` видеозапись телеметрической передачи данных на Землю по ТМ каналу	Пористые трубки с питательным раствором или в гранулированной среде с нутриентами	Для МКС, 2002 г. (Crabb et al., 1998, 2001; Stadler et al., 2004).
18	BPS, Корпорация ORBITEC, г. Медисон, США, Космический центр им. Кеннеди НАСА, США	(2) x 640 или 4 x 240	До 70	Температура и влажность воздуха и корневой зоны; концентрация CO <sub>2</sub> и C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> в воздухе; светопериод; облученность; скорость воздуха. Изоляция от атмосферы КК	Регистрация и управляемых параметров; видеозапись телеметрической передачи данных на Землю по ТМ каналу	Пористые трубки в арцелите с медленно действующими удобрениями	Для МКС (Morrow et al., 2001; 2004)

1	2	3	4	5	6	7	8
19	LADA, ИМБП (Москва), Ун-т штата Юта (США)	(2) x 252	65	Скорость воздуха при вентиляции; температура, влажность воздуха и субстрата, облученность, Фильтрация летучих углеводородов	Регистрация и управляемых параметров, фотосъемка	"Турфейс <sup>TM</sup> " + удобрение "Осмокот"	МКС, 2002 г. (Bingham et al., 2002)
20	СРБФ, Висконсинский центр по космической робототехнике, (WCSAR), г. Медисон , США	2400	До 240	Температура и влажность воздуха и корневой зоны; концентрация CO <sub>2</sub> и C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> в воздухе; светопериод; облученность; скорость воздуха. Фильтрация летучих углеводородов	Регистрация и управляемых параметров; видеозапись	Пористые трубки в арцелите ("Турфейс") с медленно действующими удобрениями	Для МКС. (Zhou, Turner, 2000; Turner, Zhou, 2000)
21	ADVANCED ASTROCULTURE, Висконсинский центр по космической робототехнике (WCSAR), г. Медисон, США	2400*	До 300*	Температура и влажность воздуха и корневой зоны; концентрация CO <sub>2</sub> и C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> в воздухе; светопериод; облученность; скорость воздуха. Фильтрация летучих углеводородов	Регистрация и управляемых параметров; видеозапись	Пористые трубки в арцелите ("Турфейс") с медленно действующими удобрениями	МКС. 2001 г. (Zhou et al., 2002,2004)

\*Оценки даны по докладу (Zhou et al., 2004)

Наиболее мощное освещение (до  $1100 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) среди уже построенных исследовательских космических оранжерей имеет в настоящее время американская установка CPBF, при этом светильник в ней может работать как на люминесцентных лампах, так и на красных и синих светоизлучающих диодах. Эта же установка имеет наибольшую среди научно-исследовательских космических оранжерей посадочную площадь, которая в 2,5 раза больше, чем была у оранжереи "Свет". На рис. 1.8 и 1.9 показан внешний вид американских оранжерей Plant Growth Unit (PGU) и Biomass Production System (BPS). Максимальная потребляемая мощность у большинства существующих научно-исследовательских оранжерей не превышает 230–260 Вт, за исключением последних оранжерей CPBF и ADVANCED ASTROCULTURE, средняя потребляемая мощность для которых планируют довести до 300 Вт. Такие уровни энергообеспечения соответствовали ресурсам ОК "Мир", а ныне – МКС в современной конфигурации.

В заключение следует упомянуть несколько конструкций исследовательских оранжерей, которые, хотя и не были использованы в полетных экспериментах, как пример применения оригинальных технических решений. К ним, например, можно отнести оранжереи, содержащие бортовые центрифуги, предназначенные для более точного выявления воздействия фактора гравитации на растения. Одна из таких установок "Биограви-1" использовалась для изучения семян, проростков и других биообъектов, не требующих освещения (Машинский и др., 1976). В 1980-е годы в Институте ботаники АН ЛитССР была сконструирована оранжерея "Нерис" с бортовой центрифугой с двумя вегетационными блоками, освещаемыми

Внешний вид оранжереи PGU

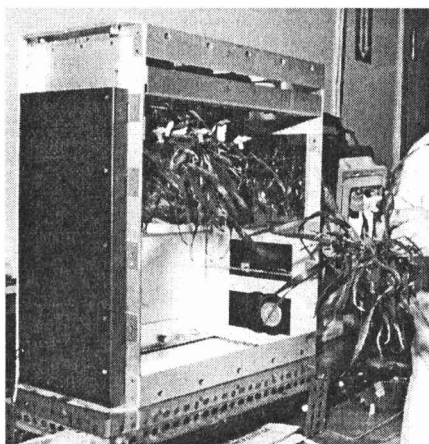


Рис. 1.8

Внешний вид оранжереи BPS

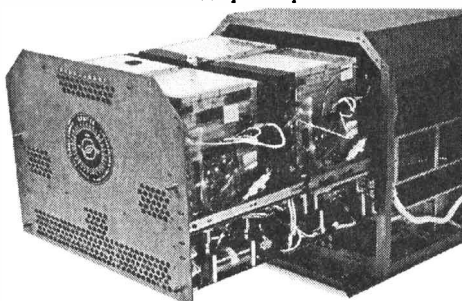


Рис. 1.9

бортовым светильником, обеспечивавшем облученность растений в области ФАР 15–20 Вт/м<sup>2</sup>. Установка позволяла культивировать малорослые теневыносливые растения типа арабидопсиса или мари в течение полной вегетации (до 50 сут) под действием ускорений от 0,005 до 1 g. Общий вид и описание КО “Биогравитат-1” и “Нерис” даны в работе (Merkys, 1990).

В конце 1990-х гг. по заказу Европейского космического агентства фирмой "Дорнье Системс" была построена исследовательская космическая оранжерея для возвращаемого искусственного спутника Земи под названием EURECA Botany Facility (BF) (Forth, Loser, 1987; Garvin, Kingdon, 1987). Общий вид этой установки в поперечном сечении показан на рис. 1.10. Установка содержала 18 кювет с посадочной площадью 25 см<sup>2</sup> каждая для культивирования растений в условиях микрогравитации и 6 аналогичных контрольных кювет, установленных на центрифуге с ускорением 1 g в той же установке. Облученность растений составляла 20 Вт/м<sup>2</sup>, в установке автоматически поддерживалась концентрация O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>, а также давление и влажность воздуха. Публикации об использовании установки BF в космических экспериментах обнаружить не удалось.

Интерес к построению оранжерей со встроенными центрифугами несколько снизился после того, как была экспериментально показана возможность прохождения полного онтогенеза высших растений в условиях микрогравитации (Меркис и Лауринвичус, 1983; Merkys, 1990, Сычев и др., 2002). В настоящее время американские исследователи планируют к использованию оранжерею PRU для исследований реакций гравитропизма растений на МКС в 2,5-метровой бортовой центрифуге (Heathcote et al., 1996).

Общий вид опытного образца космической оранжереи Botany Facility

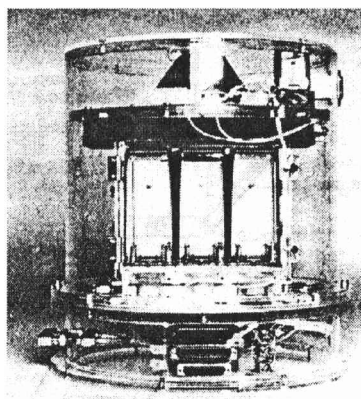
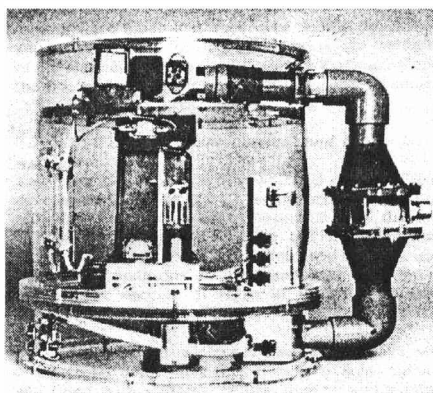


Рис. 1.10

В 80-е годы во ВНИИ биотехника в Москве совместно с КБ Агрофизического НИИ в Ленинграде была создана исследовательская аппаратура для выращивания растений методом аэропной культуры в условиях микрогравитации под названием "ГИДРОСИСТЕМА". Предполагалось применение этой аппаратуры в комплекте с последней модификацией оранжереи "Оазис". Аппаратура прошла часть наземных испытаний, однако по ряду организационных причин не работала в условиях космического полета. Общий вид аппаратуры дан на рис. 1.11, любезно предоставленном нам соавторами ее конструкции В.Г.Чучкиным и А.Г.Иорданом. Vegetационная установка включала аэропную кювету, снабженную крышкой с посадочными гнездами. Внутренняя поверхность кюветы была изготовлена из пористого материала, играющего роль водно-воздушного сепаратора. Питательный раствор подавался дозами по определенной временной программе на вращающийся с большой скоростью диск центробежной форсунки, расположенный у дна кюветы. В результате полученная взвесь заполняла весь объем кюветы, при этом корни растений постоянно находились в мелкодисперсной водно-воздушной среде. Излишек питательного раствора, попадая на пористую внутреннюю поверхность кюветы, отсасывался из нее мембранным насосом в гидравлическую магистраль системы, а свежий раствор подавался автоматически насосом по мере убыли в процессе культивирования растений. Позже интерес к аэропонике для космических оранжерей проявили американские специалисты (Clawson et al., 2000), однако о разработке реальной конструкции такой оранжереи в печати не сообщалось. В главе 3 мы еще вернемся к обсуждению достоинств и недостатков аэропного способа увлажнения корней растений в космических оранжереях.

В целом, исследовательские космические оранжереи позволили провести в полетах многие десятки экспериментов с растениями, основные результаты которых обобщены ряде изданий (Дубинин, 1984; Ильин и Парфенов, 1979; Krikorian, Levine, 1991; Nechitailo, Mashinsky, 1993; Сычев и др., 1999). Анализ накопленных данных позволяет сделать несколько выводов, существенных для специалистов по проектированию космических оранжерей:

1. по крайней мере, некоторые виды растений могут в условиях

Общий вид аппаратуры "Гидросистема"

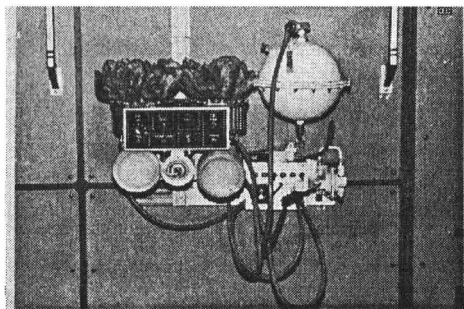


Рис. 1.11

- космического полета на орбитальных станциях проходить полный цикл онтогенеза и давать полноценные семена;
2. при отсутствии гравитропических реакций в условиях микрогравитации ориентация надземных и подземных органов растений может осуществляться за счет реакций других тропизмов, обусловленных, например, градиентами света в надземной среде или градиентами влажности субстрата и концентраций минеральных элементов в корнеобитаемой среде, и др.;
  3. между растениями, выращенными в условиях космического полета и в наземных условиях при адекватных параметрах среды, могут отсутствовать существенные различия в сроках наступления основных фаз онтогенетического развития, а также в морфометрических и биохимических характеристиках.

#### **1.4. Зеленные, или витаминные, космические оранжереи для условий микрогравитации**

Повышение энерговооруженности космических станций, очевидные выгоды регенерации среды обитания космических экипажей с помощью высших растений в процессе длительных полетов, а также прогресс в космических исследованиях с растениями и в разработках технологии и конструкций для научно-исследовательских оранжерей послужили стимулом для создания производственных оранжерей для орбитальных космических станций. Тем не менее даже на относительно крупногабаритной ОК "Мир" жесткие энерго-весовые и габаритные ограничения не позволили создать оранжерею с производительностью, которая удовлетворяла бы пищевые потребности экипажа хотя бы по отдельным группам веществ. В работе (Гришин, 1993), например, приведены данные расчетов, показавших, что при использовании традиционных технологий культивирования растений для удовлетворения 70 % потребности экипажа из 4 человек в балластных веществах (клетчатка и пектин) с калорийностью ежедневно получаемой биомассы, составляющей 280 ккал, необходима овощная оранжерея с посадочной площадью 8 м<sup>2</sup>, массой около 600 кг и с энергопотреблением 3,5 кВт. Такие ресурсы были недоступны на ОК "Мир" и, по-видимому, не будут доступны для оранжереи МКС в течение ближайших лет.

Была выдвинута альтернативная идея обеспечивать производство витаминной зелени для космических экипажей не за счет интенсивного культивирования листовых культур, а путем выгонки листовой массы луковичных или корнеплодных культур или регулярным прорастиванием на борту партий семян злаковых растений: пшеницы, ячменя и т.д.



(Левинских, 2002). Очевидно, что эти методы требуют гораздо меньших уровней освещения и, следовательно, меньшего потребления бортовой энергии. Однако внимательное рассмотрение показывает, что на пути использования такой идеи есть "подводные камни". Для листовых культур вес семени обычно составляет не более нескольких мг, а средняя сухая масса листового растения в урожае космической оранжереи обычно имеет массу в несколько граммов. Таким образом, кратность увеличения в процессе фотосинтеза биомассы запасенных на корабле семян до товарной продукции составляет около 1000. В случае выгонки зелени из луковниц или корнеплодов суммарная сухая масса полезной продукции не превышает сухую массу посадочного материала, да и сырая биомасса листьев лука не превышает массу посадочных луковниц (Смирнов, 1980). Другими словами, для выгоночной культуры необходимо запастись в полет посадочного материала больше или приблизительно столько же по массе, сколько космонавты смогут употребить в пищу. Строго говоря, такой посев почти не синтезирует дополнительную салатную биомассу, а лишь изменяет состав запасенной биомассы, причем, как правило, с потерями. Другой серьезной проблемой является длительное хранение посадочного материала для выгоночных культур: для этого требуется сооружение климатической камеры с прохладным воздухом и вентиляцией, очистка воздуха от газообразных выделений и микрофлоры, т.е., по существу, создание дополнительного блока к оранжерее. Технология проращивания семян зерновых культур на борту космического корабля в качестве источника витаминной зелени тоже практически не приводит к увеличению массы пищи на борту космического корабля. В пищу обычно употребляют двух-трехдневные проростки, которые хорошо усваиваются человеком (Драгомпрецкий, 1998). По мере роста усвояемость биомассы проростков резко снижается. За столь короткий срок сухая масса проростков практически не изменяется по сравнению с сухой массой семян, увеличение массы проростка идет за счет поглощения воды. Таким образом, хотя суммарные ресурсы, потребляемые в установках для выгонки зелени или для проращивания семян, за короткое время, например несколько дней или недель, могут быть меньше по сравнению с зеленой оранжереей, приведенная масса последней с увеличением длительности ее использования будет "окупаться" за счет многократного увеличения суммарной биомассы урожаев в ней по сравнению с запасенными семенами. Мы уже отмечали выше, что системы, построенные на запасах веществ, начинают уступать по приведенной биомассе регенерационным системам, воспроизводящим это вещество внутри системы, через характерное время, называемое "временем окупаемости". Вследствие этого мнение о том, что выгонка зелени на борту космического корабля более эффективна, чем интенсивное культивирование фотосинтезирующих растений в салатных космических оранжереях может быть справедлив лишь для краткосрочных полетов. При сравнении затрат

бортовых ресурсов в различных вегетационных устройствах необходимо учитывать потребление всех вспомогательных блоков и подсистем оранжерей. В упомянутой выше работе как раз не были учтены дополнительные затраты на хранение на борту космической станции посадочного материала, зависящие, в частности, от длительности автономной работы установки для выгонки лука, что и привело к неточным выкладкам и соответствующим выводам.

Анализ удельной продуктивности посевов показывает, что затраты на получение единицы полезной биомассы для различных сельскохозяйственных культур могут различаться во много раз. В работе (Berkovich et al., 2004) было показано, например, что по удельной продуктивности на затраченные для культивирования ресурсы, посевы зеленых салатных культур имеют эффективность примерно на порядок более высокую, чем посевы пшеницы. Именно поэтому первоочередными кандидатами на воспроизводство растительной продукции на современных космических кораблях были признаны салат, листовая капуста, листовая горчица и другие подобные растения.

В 1994 г. Ракетно-космическая корпорация (РКК) "Энергия" – ведущий разработчик ОК "Мир" и российского сегмента МКС – приняла техническое решение о разработке салатной оранжереи с потребляемой мощностью 1 кВт для одного из модулей станции МКС. Как показали расчеты, при правильном выборе технологии выращивания растений такая мощность позволяет организовать производство витаминной салатной зелени в количестве, достаточном для удовлетворения потребностей экипажа в некоторых витаминах и в пищевых волокнах.

Оценим приближенно, какое количество витаминной зелени можно получить при потребляемой мощности 0,23 кВт, характерной для современных исследовательских космических оранжерей, если использовать применяемые в них технологии. Будем считать, следуя работе (Davis, 1994), что на освещение растений в вегетационных камерах тратится порядка 90 % потребляемой электроэнергии. Выразим производительность салатной оранжереи по хозяйственно-полезной биомассе в зависимости от потребляемой светильником оранжереи мощности,  $N_c$ , согласно закону сохранения энергии для светокультуры растений (Адамович, Горшенин, 1997; Чучкин, 1967; Чучкин и др., 1983), следующим соотношением:

$$P_n = 0,9 \eta_c \eta_\phi t K_n k_{\text{хоз}} N_c / (\xi q), \quad (1.1)$$

где  $P_n$  – урожай по полезной сырой биомассе за время  $t$ ;  $\eta_c, \eta_\phi$  – энергетический к.п.д. светильника оранжереи и к.п.д. фотосинтеза соответственно;  $K_n$  – коэффициент поглощения света посевам;  $k_{\text{хоз}}$  – коэффициент хозяйственного использования для выбранной культуры,

т.е. доля съедобной продукции в общей биомассе растений;  $\xi$  - доля сухого вещества в биомассе;  $q$  – калорийность сухой биомассы.

Значение энергетического к.п.д. светильника,  $\eta_c$ , зависящее от типа источника света и конструкции отражателей и пуско-регулирующей автоматики ламп, обычно не превышает значения 0,15 для известных осветительных средств (Клешнин, 1954; Сидько и др., 1980; Швецов, Мудрак, 1980). Теоретический предел к.п.д. фотосинтеза,  $\eta_{\phi}$ , как известно, равен 34 %, а реальное его значение для высокоинтенсивных посевов не превышает 13,5 % (Salisbury, Bugbee, 1988; Bugbee, Monje, 1992), что согласуется с сообщениями о максимальном экспериментальном значении  $\eta_{\phi}$ , равном 12 %, полученным в светокультуре пекинской капусты (Чучкин и др., 1983). Среднее за вегетацию значение коэффициента поглощения света посевом,  $K_p$ , равное доле поглощенного посевом светового потока ФАР, падающего на посев, за вычетом части, отраженной и дошедшей до посадочной поверхности, для посевов салатных культур без раздвижения в процессе вегетации близко к значению 0,7. Для очень густого посева пшеницы или салатной культуры в искусственных условиях этот коэффициент может достигать 0,9 (Чучкин и др., 1983; Bugbee, Monje, 1992).

Для оценки максимального суточного урожая салата воспользуемся экспериментальными значениями  $k_{\text{хос}}$  и  $\xi$  из работ (Wheeler et al., 1994; Knight, Mitchell 1983), полученными авторами в широкомасштабных опытах в лабораторных условиях и в вышеописанной оранжерее ВРС Космического центра им. Кеннеди НАСА. Для посевов салата, культивируемых на гидропонике под лампами ДНаТ при облученности около 60 Вт/м<sup>2</sup> на площади 20 м<sup>2</sup> при 16-часовом фотопериоде, были получены следующие результаты:  $k_{\text{хос}}= 0,88$ ;  $\xi = 0,053$ . Для более интенсивного режима выращивания салата при облученности ФАР до 180 Вт/м<sup>2</sup> и фотопериоде 20 ч дана оценка  $k_{\text{хос}}= 0,78$  (Salisbury, Bugbee, 1988). Возьмем максимальную из этих величин. Калорийность сухой биомассы для наших расчетов может быть принята равной 4 ккал/г, или 4,6 Вт·ч/г (Чучкин, 1967). Подставив длительность светопериода  $\tau = 20$  ч/сут, а также значения остальных параметров в уравнение (1), получим оценку потенциальной максимальной суточной производительности по салату в рассматриваемых космических оранжереях:

- при потребляемой мощности 0,23 кВт - 183 г/сут;
- при потребляемой мощности 1 кВт - 800 г/сут.

Полученные расчетные оценки для космических оранжерей являются, конечно, приближительными по двум основным причинам: к.п.д. осветителей существенно зависят от их конструктивной реализации, а к.п.д. фотосинтеза - от уровня облученности посева и условий среды в оранжерее. Практически получаемая суточная продуктивность посевов

салатных культур в условиях наземных герметизированных оранжерей, описанных в разделе 1.1.1, не превышала 140 г/кВт·сут (по сырому весу) (Гительзон и др., 1975; Терсков и др., 1979; Шепелев, 1975; Wheeler et al., 1996; Wheeler et al., 1994). Более высокие значения: около 400 г/кВт·сут (при светопериоде 16 ч/сут) были достигнуты в наземном макете конвейерной гидропонной раздвижной оранжереи “Самород - Арктика” с посадочной площадью 0,5 м<sup>2</sup> в конце 80-х годов (Левинских, 2002; Адамович и Горшенин, 1997; Чучкин и др., 1983). Таким образом, можно ожидать, что удельная суточная производительность зеленых космических оранжерей при их длительном функционировании на космических кораблях может составить в ближайшем будущем величину около 200 г/кВт установочной мощности за счет совершенствования источников света, конструкций светильников, кондиционирования и очистки газовой среды растений и оптимального выбора режимов их культивирования. Однако уточнить оценку удельной продуктивности можно будет лишь в процессе эксплуатации витаминной оранжереи на борту МКС.

Пользуясь предварительной оценкой, можно подсчитать, что реальная суточная производительность по сырой биомассе любой из исследовательских оранжерей, перечисленных в табл. 1.1, вряд ли сможет превысить 45 г/сут. Учитывая, с другой стороны, что суточная норма потребления большинства салатных культур для одного человека, составляет 50-150 г по сырому весу для получения суточной дозы витаминов С и А (Березовский и др., 1997; Покровский и Самсонов, 1981), можно сделать вывод, что любая из исследовательских оранжерей с энергопотреблением около 230 Вт не сможет существенно улучшить рацион космического экипажа хотя бы по отдельным витаминам. Кроме того, газовый объем внутри большинства исследовательских оранжерей изолирован от кабины пилотируемого космического корабля для улучшенного контроля состава воздуха. Такие оранжереи снабжены таким большим количеством аппаратуры для наблюдения за состоянием растений и среды обитания, что не нужно для рутинного производства зелени при отработанной технологии. Параллельное применение нескольких исследовательских космических оранжерей для увеличения суммарного выхода зеленой биомассы также неэффективно, так как существенно увеличивает суммарную приведенную массу установки по сравнению со специализированной витаминной оранжереей, специально оптимизированной по критерию максимума удельной производительности или минимума эквивалентной массы.

С этой точки зрения вряд ли можно считать оправданным предложение классифицировать оранжереи "Оазис-А", "Оазис-3", РGBА и ВРS как производственные оранжереи для космических экипажей, состоящих из нескольких человек (Nechitailo, Mashinsky, 1993; Адамович, Горшенин, 1997; Noehn et al., 1997). По нашему мнению, в производственных космических оранжереях должны быть использованы иные конструктивные принципы и технологические решения, нежели в научно-исследовательских. Мы подробно проиллюстрируем эффективность такого подхода в главе 3 данной монографии.

Характеристики известных зеленых космических оранжерей представлены в табл. 1.2. Одной из космических оранжерей, специально разработанных в качестве зеленных, является установка "Карусель", которая была изготовлена в красноярском Институте биофизики в начале 80-х годов (Ковров, Мартыненко, 1981). Первоначальный вариант под названием "Карусель-3М" изображен на рис. 1.12. В основу конструкции оранжереи заложены две основные идеи:

- аэропонный способ культивирования растений с обеспечением стационарного потока водяной взвеси в корнеобитаемой зоне за счет вращения корневого модуля;
- раздвижение растений в посеве в процессе их роста с помощью спирально-лучевого механизма, предложенного впервые В.Г.Чучкиным в работе (Чучкин, 1967) и усовершенствованного позже в работах (Мельников и Посадский, 1974; Бегров, 1975).

Внешний вид витаминной космической оранжереи "Карусель-3М"

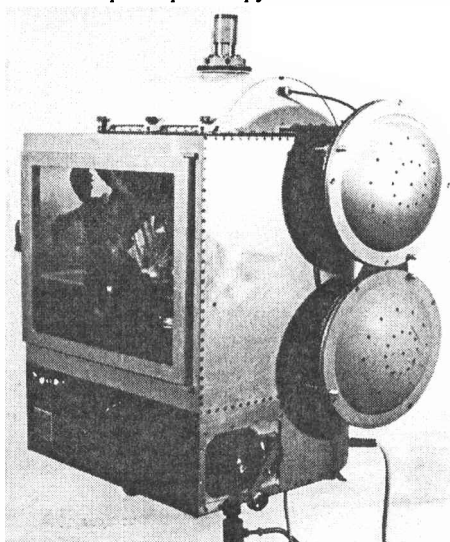


Рис. 1.12

Характеристики зеленных космических оранжерей

Название, изготовитель	Площадь посева растений, м <sup>2</sup>	Объем*, м <sup>3</sup>	Потребляемая мощность, Вт	Потенциальная производительность**, г/сут
“Карусель-4М”, ИБФ СОРАН, г.Красноярск	0,5	0,6	550	110
КОКОР “Витацикл”, ГНЦ РФ ИМБП, Москва	1,1	0,35	1000	200
“Salad Machine”, Эймсский космический центр НАСА, США	(4 x 0,7)	1,3	1300	86

\* Даны оценки объема без рабочей зоны, определенные на основе описания и иллюстраций установок.

\*\* Оценки получены в пересчете на съедобную сырую биомассу листовой капусты.

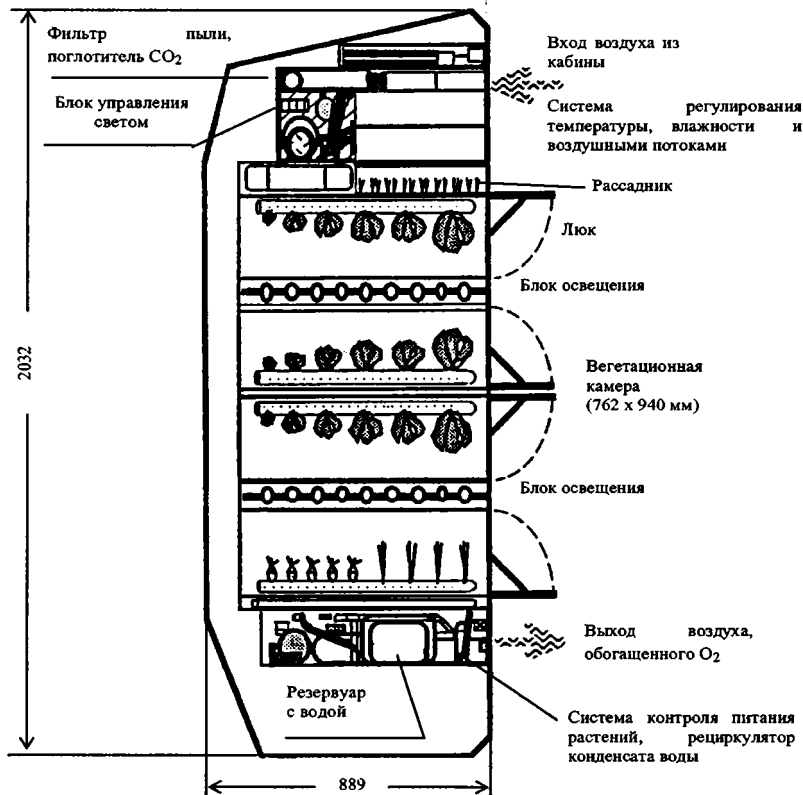
Оранжерея “Карусель” предназначалась для конвейерного культивирования розеточных овощных растений типа редиса, листовой капусты, свеклы и т.д. Мощность энергопотребления в этом варианте составляла всего 216 Вт соответственно, номинальная производительность по сырой биомассе предполагалась равной 30 г/сут, а срок работы без дозаправки - 60 сут. Более крупная модификация космической оранжереи “Карусель-4М” была выполнена в виде цилиндра диаметром 0,8 м и высотой 1,5 м и разделена на верхний вегетационный отсек и нижний аппаратный (Ковров и Мартыненко, 1981). В верхнем отсеке были установлены два горизонтальных, вращающихся со скоростью 40 об/мин посадочных диска в виде спирально-лучевых культиваторов диаметром 0,55 м, расположенных соосно на расстоянии 0,5 м один под другим с направленными друг к другу посадочными поверхностями. Дуговая лампа ДНАТ-400 была расположена в центре отсека, между посадочными дисками. По мере роста растения раздвигались от центра к периферии дисков. Спелые растения последнего шага конвейера убирала на периферии дисков, а растения первого шага высаживали в центральной части дисков. Питательный раствор непрерывно распылялся через радиально расположенные горизонтальные сопла в центральной части корневой зоны дисков, т.е. на корни ювенильных растений, а затем стекал к периферии дисков за счет центробежной силы. Прошедший корневую зону раствор осаждался на

гидрофильных стенках и подавался в кольцевые сборники, откуда снова закачивался в форсунки. Предполагалось выращивать растения на питательном бессменном растворе с периодической коррекцией по сигналу изменения рН путем подачи в водосборник доз воды и маточного раствора солей. Теплоъем осуществляли с помощью вентилятора за счет прокачки воздуха через теплообменник с хладагентом.

К недостаткам конструкции оранжереи “Карусель” нужно отнести сравнительно небольшую производительность, обусловленную низким электропотреблением и малой посадочной площадью. Кроме того, примененный в ней аэропонный метод с форсунками, как показали испытания аэропонной аппаратуры “Гидросистема”, был недостаточно отработан даже в наземных условиях и, соответственно, не испытан в условиях микрогравитации (Беркович, 1996). Можно отнести к недостаткам и наличие вращающихся вегетационных блоков, поскольку это снижало надежность всего устройства в целом. Однако для своего времени конструкция оранжерей “Карусель” воплотила ряд новаторских разработок и явилась значительным шагом на пути создания современной салатной космической оранжереи.

Американская космическая оранжерея “Салатная машина” была задумана в 80-е годы для снабжения салатной зеленью экипажа из 4 человек для так и не реализованной орбитальной станции “Freedom”, а затем продолжала разрабатываться для МКС (Kliss et al., 1998). Конструкция этой оранжереи была вписана в стандартную стойку для многоцветного корабля “Шаттл” и схематично показана на рис. 1.13. В “Салатной машине” была использована 4-ярусная компоновка посадочных поддонов, причем лампы размещены между каждой парой поддонов. Таким образом, растения в условиях микрогравитации должны были расти на соседних по высоте поддонах в противоположные стороны. Такая компоновка была предложена ранее и российскими разработчиками в 1983 г. в описании к авторскому свидетельству, где был показан ряд ее преимуществ, приводящих к улучшению объемных и энергетических характеристик оранжереи (Анисимов и др., 1983). В первоначальном варианте “Салатной машины” предполагался метод выращивания растений на твердых пористых субстратах. Для этой оранжереи было предложено оригинальное устройство подачи воды или питательного раствора к корням растений через пористые мембраны “Система подачи питательного раствора по требованию” (On demand nutrient delivery system, ODNDS) (Heathcote et al., 1996; Kliss et al., 1998; Heyenga, 1996; Heyenga, 1997). Однако установка со столь большими, как у “Салатной машины”, потребляемой мощностью и объемом, а также с не испытанной в условиях космического полета гидропонной системой корневого питания не смогла найти применение в МКС. Вследствие

Конструктивная схема витаминной космической оранжереи "Салатная машина" (НАСА) в составе стандартной двойной стойки для "Шаттла"



Посадочная площадь и объем вегкамеры 2,86 м<sup>2</sup> и 0,8 м<sup>3</sup> соответственно

Посадочная площадь и объем растительи 0,66 м<sup>2</sup> и 0,5 м<sup>3</sup> соответственно

Рис. 1.13



этого американские исследователи рассматривали возможности использования этой оранжереи в наземных экспериментах по программе BIOPlex в Космическом центре им. Джонсона НАСА.

В настоящее время имеются сведения о разработках новых конструкций салатных оранжерей для будущего космического применения. Обе они используют цилиндрическую компоновку вегетационной камеры. Первыми работы в этом направлении еще в 1980-е годы начала группа исследователей из Института медико-биологических проблем (ИМБП) в Москве в составе Ю.А.Берковича, В.Л.Корбута и В.Н.Павловского (Беркович и др., 1982, 1985). Основные технические решения были запатентованы с 1979 по 1985 гг. К настоящему времени в ИМБП изготовлены несколько наземных прототипов цилиндрических конвейерных салатных оранжерей, ориентированных на условия космического полета: "Витацикл", "Фитоцикл СД", а в 2005 г. запланировано изготовление прототипа оранжереи "Фитоконвейер" с потребляемой мощностью 250 Вт применительно к Российскому сегменту МКС.

В 1992 г. появились сообщения о разработке в Японии еще одного варианта вертикальной секционированной цилиндрической оранжереи для производства салатных растений в будущих биолого-технических системах жизнеобеспечения (Takai et al., 2004; Takashima, 1999). Ориентировочная суммарная мощность светильников из двух охлаждаемых водой дуговых натриевых ламп или панелей из красных и синих светонзлучающих диодов составляет, по-видимому, около 800 Вт. Установка находится в стадии наземных испытаний с целью оптимизации конфигурации отдельных подсистем. К сожалению, до настоящего времени нам не удалось обнаружить опубликованных данных о рабочих характеристиках установки, поэтому сравнительный анализ эффективности этой оранжереи остался за рамками данной книги.

Результаты анализа конструкций существующих зеленных космических оранжерей, которые будут подробно изложены в главах 4 и 5, выявили ряд существенных преимуществ цилиндрических конвейерных овощных космических оранжерей, разработанных нами в ИМБП совместно с рядом организаций промышленно-космического комплекса России, для улучшения пищевого рациона космических экипажей на МКС и в последующих пилотируемых космических полетах (Berkovich et al., 2004a). Основными особенностями таких оранжерей являются:

- выращивание непрерывного растительного конвейера в самораздвигающемся посеве на цилиндрической посадочной поверхности, составленной из многих корневых модулей (шагов конвейера);

- применение экономичного светильника в виде спирального цилиндра, направляющая которого отображает кривую роста зеленных растений;
- применение специально разработанного почвозаменителя на ионообменных волокнах;
- применение способа реверсивной периодической водоподачи в корнеобитаемую зону через запорную мембрану;
- применение роторного принципа организации технологического обслуживания посевов.

Удобством предложенной компоновки является также возможность ее применения с сохранением всех ее основных преимуществ, но с уменьшенной производительностью в случае сокращения выделяемых ресурсов на борту МКС. Возможно создание на описанном принципе модульных конструкций для наращивания производительности и увеличения разнообразия получаемой растительной продукции.

## **ГЛАВА. 2. ВОЗДЕЙСТВИЕ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ НА РАСТЕНИЯ В КОСМИЧЕСКИХ ОРАНЖЕРЕЯХ**

Конструктивные и технологические решения при разработке космической оранжереи в существенной степени определяются ее назначением и условиями применения. При проектировании космической оранжереи для той или иной космической миссии необходимо учитывать факторы космического полета, сопутствующие данной миссии, и возможные последствия их воздействия как на растения, так и на весь биоценоз, формирующийся в оранжерее при культивировании растений в условиях космического полета. Согласно общепринятой в настоящее время классификации, выделяют следующие группы факторов космического полета: внешние (космическая радиация, вакуум, перепады температуры), динамические (микрогравитация, ускорения, вибрации, шум) и факторы среды обитания внутри пилотируемого космического корабля (изоляция гермообъема, искусственная газовая среда, отсутствие геомагнитного поля, температурные и барометрические колебания и др.) (Nechitailo, Mashinsky, 1993; Парфенов, 1988; Merkus, 1990; Сычев и др., 1999; Ильин и Парфенов, 1979; Дубинин, 1984).

### **2.1. Воздействие на растения внешних факторов космического полета**

Околосреднее космическое пространство в ионосфере Земли, где пролегают орбиты орбитальных станций, характеризуется давлением среды порядка  $10^{-12} - 10^{-14}$  Па, температурой от 200 до 1000 °К, а также наличием электромагнитных и корпускулярных излучений, в том числе и ионизирующих, интенсивность которых существенно различна в разных зонах магнитосферы (пояса радиации) и меняется во времени (солнечные вспышки) (Газенко, Кальвин, 1975). Среди внешних факторов космического полета непосредственное влияние на развитие растений и биоценоза оказывает радиационное излучение.

Радиацию рассматривают прежде всего как фактор, повреждающий живые организмы. В связи с этим основной объем исследований по изучению влияния радиационного излучения на живые объекты выполнен с использованием высоких, от 10 – 100 Гр и выше, доз излучения, приводящих к значительным повреждениям и даже гибели организмов. Вместе с тем к настоящему времени накоплен достаточный объем данных, указывающих на то, что при более низких, от 100 до 2000 мкГр, дозах вызываемые радиационным излучением изменения не только могут быть совместимы с жизнедеятельностью живых организмов, но в ряде случаев и активизировать в них процессы роста. Основными источниками радиационного повреждения растений в околосреднем космическом пространстве могут быть проникающие внутрь космического корабля потоки протонов, электронов, нейтронов,  $\alpha$ -частиц, и тяжелых многозарядных ионов, а также

электромагнитное излучение, включая рентгеновские,  $\gamma$ -лучи и ультрафиолетовое излучение. Они могут приводить к снижению жизнеспособности организмов. Известны данные о понижении всхожести и энергии прорастания семян, уменьшении выживаемости и семенной продуктивности растений (Гродзинский, 1989).

Радиационная устойчивость различна у разных видов растений. В табл. 2.1, взятой нами из работы (Clawson et al., 1999), приведены летальные и эффективные дозы ионизирующей радиации для некоторых растений.

Таблица 2.1

Эффекты ионизирующей радиации на растения  
(Clawson et al., 1999)

Организм	Нижняя граница проявления эффекта, сЗв	Летальная доза, сЗв
Человек (годовой предел 5 сЗв)	25	450
Лук	377	1,491
Пшеница	1,017	4,022
Кукуруза	1,061	4,197
Картофель	3,187	12,60
Рис	4,974	19,677
Фасоль (обыкновенная)	9,137	36,149
Потенциальная доза:	Минимум солнечной активности:	40
	Максимум солнечной активности:	120
	Протонная вспышка:	500

Для сосны смолистой, например, летальная поглощенная доза излучения составляет около 6 Гр, для шалфея – на 2 порядка больше, а для салата, свеклы и фасоли предельные поглощенные дозы излучения порядка 250–300 Гр (Адамович и Горшенин, 1997, Tobias, Todd, 1974, Григорьев, 1982, Бобков и др., 1967, Герцуский и др., 1967). Воздушно-сухие семена растений обладают гораздо большей радиационной устойчивостью, чем вегетирующие растения (Гродзинский, 1989). Например, летальная для сухих семян капусты суммарная поглощенная доза  $\gamma$ -излучения составила около 2500 Гр, а замоченные в течение 12 ч семена погибали при дозе  $\gamma$ -излучения в 250–300 Гр (Гительзон и др., 1976). Воздушно-сухие семена креписа, арабидопсиса и салата, экспонированные в течение месяца в открытом космосе на поверхности биоспутников серии “Космос”, почти не изменяли посевных качеств по сравнению с контролем внутри спутников при условии, что была обеспечена защита от ультрафиолетового излучения; однако было отмечено возрастание аберрантных клеток в связи с резким повышением суммарной поглощенной дозы ионизирующей радиации (Nechitailo, Mashinsky, 1993; Ильин и Парфенов, 1979; Анисеева и др., 1992, Максимова и др., 1992; Газенко и Кальвин, 1975; Абрамова, 1971).

Интересно, что при длительных экспозициях воздушно-сухих семян растений на борту космических станций и спутников иногда наблюдали стимуляцию их всхожести и усиление роста проростков (Дубинин, 1984; Газенко и Кальвин, 1975). Поглощенные дозы ионизирующего  $\gamma$ -излучения при этом составляли не более 70 – 80 мГр. Однако при дальнейшем выращивании растений из таких семян в ряде случаев отмечали морфогенетические отклонения (Nechitailo, Mashinsky, 1993). Отмечено также увеличение скорости старения сухих семян при их длительном, до 827 сут, хранении на борту орбитальных станций (Дубинин, 1984).

Радиационная чувствительность растений может изменяться при сочетании радиационного воздействия с другими факторами космического полета. Например, в прорастающих семенах салата частота появления аберрантных клеток, образовавшихся под действием космического ионизирующего излучения в условиях открытого космического пространства, снижалась при сочетании ионизирующего излучения с солнечным световым излучением (Максимова и др., 1992).

В целом, средняя летальная поглощенная доза радиации для растений значительно выше таковой для человека (Адамович и Горшенин, 1997, Cuello et al., 1998), поэтому, как правило, нет оснований опасаться гибели растений при культивировании их на борту космического корабля. К тому же реальные мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения, зарегистрированные на борту орбитальной станции "Мир" и Международной космической станции, невелики: от 1 мГр/сут в фазе минимума солнечной активности до 0,15мГр/сут в фазе максимума солнечной активности. Таким образом, характерные для радиационной обстановки величины мощности поглощенной дозы намного меньше используемых в наземных радиобиологических исследованиях. Тем не менее данный уровень радиационного излучения, имеющийся внутри космических кораблей, может оказывать значительное влияние на рост и развитие растений как непосредственно, так и через изменение количественного и качественного состава сопутствующей микрофлоры. В ходе 15-летнего мониторинга радиационной обстановки на орбитальной станции "Мир" было выявлено, что радиационные условия в отсеках станции, отличающиеся от наземных круглосуточным воздействием хронического ионизирующего излучения, приводили к формированию из состава исходной микробиоты ассоциаций и отдельных видов микроорганизмов, обладающих измененной метаболической активностью, повышенной агрессивностью по отношению к отделочным и изоляционным полимерным материалам и способностью стимулировать коррозию металлов (Викторов и др., 1998, Митрикас и Цетлин, 2000, Цетлин и др., 2001, Цетлин и Дешева, 2003). При этом была установлена

корреляционная связь колебаний численности микроорганизмов с вариациями уровней ионизирующей радиации.

В составе грибного компонента микробного сообщества среды обитания ОК "Мир" с 1995 по 1997 г. отмечалось снижение численности жизнеспособных фрагментов и частоты встречаемости грибов вида *Aspergillus niger*, доминирующих ранее, и увеличение аналогичных показателей у микромицетов вида *Cladosporium cladosporioides*; при этом у исследуемых видов грибов наблюдали ряд морфологических изменений (Дешева, 1998). В дальнейшем наземные эксперименты показали, что у "полетных" штаммов грибов *Aspergillus niger* и *Cladosporium cladosporioides* значительно повысилась радиочувствительность, в частности, чувствительность к гамма- и гамма-нейтронному облучению. При воздействии низких доз гамма- или гамма-нейтронного облучения на "полетные" штаммы грибов наблюдали формирование плотного слоя белого вегетативного мицелия, а при повторном наземном облучении у ряда штаммов отмечали потемнение и разрастание погруженного, субстратного мицелия. У контрольных, "неполетных", штаммов слабое увеличение вегетативного мицелия было отмечено только при повторном гамма-облучении и гамма-нейтронном облучении (Цетлин и Дешева, 2003).

Аналогичные результаты были получены в наземных опытах с микромицетами *Fusarium oxysporum*, выделенными из волокнистого ионообменного почвозаменителя после 60-суточного культивирования на нем растений в условиях хронического гамма-облучения с мощностью поглощенной дозы в диапазоне 1000-1500 мкГр/сут и нейтронного облучения со средней плотностью изотропного потока 15 н/см<sup>2</sup>·с или с флюенсом 1,3·10<sup>6</sup>н/см<sup>2</sup>·сут. У грибов, выделенных из облученного почвозаменителя, наблюдали необычайно сильный для данного рода рост мицелия, но слабое формирование конидий, среди которых преобладали не характерные для него микроконидии. При выращивании *Fusarium oxysporum*, выделенного из необлученного (контрольного) и облученного почвозаменителей, в условиях хронического облучения в дозе 3,75 мГр и/или на облученной питательной среде наблюдали значительные различия в росте и спороношении обеих культур гриба. У микромицетов, выделенных из облученного почвозаменителя, наблюдали значительное усиление роста мицелия в первые 5 суток и постепенное выравнивание с контролем в период с 5-го по 12-й дни. При этом у грибов рода *Fusarium oxysporum*, выделенных из облученного почвозаменителя, не наблюдали нормального спороношения даже при выращивании на необлученной питательной среде в отсутствие хронического облучения. Отмеченные изменения в росте и развитии микробиологических сообществ могут существенно влиять на всхожесть семян и продуктивность высших растений, выращиваемых в оранжереях в условиях космического полета, а также на качество получаемой продукции.

Прямое хроническое облучение низкими, порядка 100 мк1р, поглощенными дозами нейтронного и гамма-облучения также было продемонстрировано экспериментально. Выращивание пекинской капусты *Brassica pekinensis* (lour) Rupr в условиях хронического радиационного воздействия на вегетирующие растения в сочетании с предварительным облучением семян и поливной воды в ряде опытов стимулировало рост растений. Стимулирующий эффект был сильнее выражен у 20-дневных растений по сравнению с 30-дневными.

На основании немногих пока имеющихся данных не представляется возможным выявить ни механизмы влияния сверхмалых доз радиации на живые объекты, ни факторы, способствующие усилению/ослаблению радиационного воздействия. Однако эти вопросы, по-видимому, потребуют самого тщательного экспериментального изучения, так как напрямую связаны с технологией культивирования растений в условиях космического полета.

## 2.2. Воздействие на растения динамических факторов космического полета

Среди динамических факторов космического полета, влияющих на живые организмы, особая роль принадлежит невесомости (Nechitailo, Mashinsky; 1993, Аникеева и др., 1992; Максимова и др., 1992; Алпатов и Антипов, 1992; Мелешко и Шепелев, 1992; Merkys, 1990; Дубинин, 1984; Ильин и Парфенов, 1979; Машинский и др., 1976; Perbal et al., 1997, Hoson et al., 1997, Hejnowicz, 1997). В настоящее время для характеристики условий полета на космическом корабле используют термин "микрोगравитация", который мы будем употреблять в дальнейшем, так как реально внутри космических кораблей и станций имеется целый спектр ускорений (Машинский и др., 1988; Nechitailo, Mashinsky, 1993). Большая часть регулярно действующих внутри кабины ускорений (функционирование системы ориентации станции, гравитационные орбитальные градиенты, аэродинамическое торможение, солнечное давление) не превышает по абсолютной величине  $10^{-5} g$ , где  $g$  – ускорение земной силы тяжести, а частоты их воздействий находятся в диапазоне от 0 до  $10^{-3}$  Гц. Нерегулярные и кратковременно действующие ускорения, например от передвижений экипажа, включения различных исполнительных механизмов или возникающие при стыковке космических аппаратов, могут достигать значений  $10^{-1} g$ , при этом частотный спектр их находится в диапазоне от  $10^{-3}$  до 10 Гц.

Воздействие гравитации и, в частности, микрोगравитации на рост и развитие высших растений является фактором, в значительной мере обуславливающим конструктивные особенности космической оранжереи. При рассмотрении возможных путей влияния микрोगравитации на живые организмы можно выделить:

- опосредованное влияние – через изменение гравитационно-зависимых факторов среды обитания, например распределения воды в капиллярно-пористых корнеобитаемых средах;
- непосредственное влияние – через изменение условий реализации гравитационно-зависимых функций организма, а также, возможно, через изменение протекания элементарных биологических процессов: обмена веществ, развития, размножения (Мелешко и др., 1994; Мелешко и Шепелев, 1992).

Известно, что различные органы высших растений обладают разной гравитропической реакцией: корни – положительной (по направлению силы тяжести), стебли – отрицательной (против вектора силы тяжести), а ветви и листья располагаются под разными углами относительно вектора силы тяжести. В гравитационном поле пространственная ориентация растений обусловлена главным образом совокупностью гравитропических реакций. Вопросы взаимосвязи пространственной ориентации растения с другими сторонами его метаболизма изучены пока крайне слабо. Вместе с тем получены экспериментальные данные, что инвертная ориентация растений пшеницы, сорт Арогее, в гравитационном поле, наряду с искривлением и укорачиванием соломины, приводила к значительному увеличению соотношения масс побега и корня, а также усиленному развитию побегов кущения, в том числе продуктивных. В наших опытах доля корня в сухой массе "инвертных" растений составила менее 10 %, в то время как у нормально ориентированных растений этот показатель составил в среднем 20 % (Смолянина и др., 2003). Растения культивировали на плоских пористых металлокерамических мембранах или пористых металлокерамических трубках диаметром не более 16 мм при стабилизированном водном потенциале на поверхности мембран или уровне оси трубок (рис 2.1). Диапазон водных потенциалов в корнеобитаемой зоне составил менее 0,2 кПа, что практически исключало опосредованное влияние гравитационного стока на структуру корневой системы растений. Аналогичные результаты были получены в опытах с тем же сортом пшеницы при клиностатировании растений в течение 82 суток (Мищенко и др., 2004). Вертикальное клиностатирование растений со скоростью 2 об/мин привело к уменьшению доли корня в сырой массе растения до 4,5 %, в то время как у контрольных, неподвижных, растений этот показатель составил 16 %. Уменьшение скорости роста корня относительно скорости роста побега при выращивании растений в инвертном положении было отмечено и для других культур, в частности для моркови и китайской капусты. Уменьшение доли корня в общей массе растения не оказывало негативного влияния на рост и зерновую продуктивность пшеницы в благоприятных условиях выращивания, но заметно снижало устойчивость растений к водному дефициту в корнеобитаемой зоне (Смолянина и др., 2003). При инфицировании растений вирусом полосатой мозаики пшеницы доля корня в сырой массе



контрольных растений составила 4,3 %, а для опытных растений этот показатель, в зависимости от условий клиностатирования, находился в пределах от 4,0 до 1,7 %. Интересно, что при клиностатировании растений наблюдали похожие изменения как морфологических, так и физиологических показателей, в частности значительное повышение устойчивости растений к вирусу полосатой мозаики. Таким образом, как инвертная, так и постоянно меняющаяся ориентация растений в гравитационном поле привела к практически одним и тем же изменениям архитектоники растений, а именно: значительному уменьшению массы корня при одновременном увеличении массы побега и, в частности, массы зерновок.

Анализ влияния отсутствия силы тяжести на рост и развитие растений крайне затруднен, так как в условиях космического полета результат подвержен одновременному воздействию целого ряда факторов и проанализировать непосредственное влияние микрогравитации в настоящее время вряд ли возможно. В полетных экспериментах часто растения отличались от наземного контроля, но причину тех или иных отклонений можно было назвать лишь с большей или меньшей вероятностью.

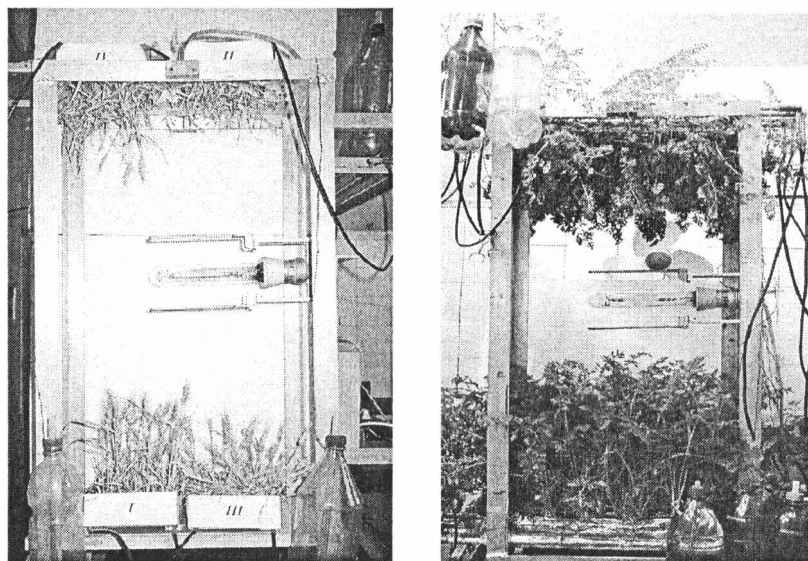


Рис. 2.1. Общий вид вегетационных стендов с растениями, выращенными при естественной и инвертной ориентации; слева – стенд с растениями пшеницы, выращенными в корневых модулях с плоскими пористыми мембранами, справа – стенд с растениями моркови, выращенными на пористых трубках

Если опосредованное влияние микрогравитации на растения очевидно, то ее непосредственное влияние на развитие растений остается предметом научных дискуссий. Успешные российско-болгарские и российско-американские эксперименты с пшеницей и гибридом листовой горчицы *Brassica rapa*, проведенные на борту ОК "Мир" в оранжерее "Свет", достоверно продемонстрировали возможность прохождения растениями всех этапов онтогенеза и формирования жизнеспособных семян в условиях микрогравитации (Сычев и др., 2002; Левинских и др., 2000, Сычев, 2000; Сычев и др., 1999). На основании этих опытов был сделан вывод о том, что гравитация не влияет на рост, развитие и размножение растений (Сычев и др., 2002; Сычев, 2000). Такой вывод, на наш взгляд, является не вполне корректным, так как тот факт, что онтогенез растений принципиально возможен в условиях микрогравитации, вовсе не означает, что онтогенетический рост и развитие растений в этих условиях проходят точно так же, как и на Земле. Имеющиеся в литературе данные отечественных и зарубежных исследователей указывают на непосредственное влияние гравитации на рост и/или морфологию растений на клеточном, тканевом и органном уровнях (Rozen et al., 1999, Tasaka et al., 1999; Медведев, 1996). Предположительно одной из возможных причин воздействия невесомости на организм растений является изменение затрат энергии, необходимых для позиционирования клеточных органелл, влияющих на метаболизм не только гравичувствительных, но и всех остальных клеток растительного организма (Scherer, 1996).

Опубликованные к настоящему времени результаты полетных экспериментов выявили, что по ряду показателей, прежде всего по семенной продуктивности, полетные растения все же уступали растениям, выращенным на Земле при аналогичных (кроме гравитационных) условиях выращивания и одинаковой структуре посева. Так, в наиболее удачном эксперименте "Оранжерея-4" с суперкарликовой пшеницей на ОК "Мир" озерненность колосьев была на 38 % ниже, чем в наземном контроле, а в первых опытах колосья полетных растений были полностью стерильны (Сычев, 2000). Причиной ингибирования репродукционных процессов в суперкарликовой пшенице могло явиться как повышение концентрации этилена и/или других газообразных загрязнителей в атмосфере ОК и вегетационной камеры (Левинских и др., 2000, Сычев, 2000; Сычев и др., 1999), так и другие факторы космического полета, например неблагоприятные температура и относительная влажность воздуха, которые способны вызвать подобные изменения даже при нормальном газовом составе атмосферы (Смолянина и др., 2000). Таким образом, растения в упомянутых опытах, как и в целом ряде более ранних космических экспериментах, были подвержены воздействию не только динамических факторов полета.

Бортовые опыты с пшеницей продемонстрировали также зависимость архитектоники корневой системы от гравитационных условий среды. В этих опытах было обнаружено равномерное распределение корней по высоте вегетационного сосуда (Сычев и др., 2002; Сычев, 2000). В наземном же контроле плотность распределения корней в вегетационном сосуде увеличивается обычно по вертикали сверху вниз, как и содержание воды в пористом почвозаменителе в гравитационном поле Земли (Berkovich et al., 2000b). Кроме того, сухая масса корней в корневых модулях оранжереи "Свет" после двух вегетаций пшеницы составила всего 10 г, тогда как сухая масса побегов только в 1-й вегетации была порядка 50 г (посев из 37 растений со средней сухой массой 1,33 г). Число растений и массу побегов во второй вегетации авторы не указали, но, учитывая, что растения были убраны в возрасте 40 дней, т.е. не ранее фазы колошения, суммарная масса побегов должна была быть сопоставима с массой побегов в 1-й вегетации. Следовательно, доля корней в общей массе посева была менее 10 %. Это указывает на возможное замедление скорости роста корней относительно скорости роста побегов аналогично тому, что наблюдали в наземных экспериментах с "инвертными" или клиностатированными растениями. Такие данные противоречат утверждению, что "рост и развитие корневой системы высших растений не зависят от гравитационного фактора" (Сычев, 2000), основанному лишь на единичных и неизбежно не очень точных подсчетах распределения массы корневой системы растений по высоте корневых модулей в космических опытах с растениями в оранжерее "Свет". Сложная конструкция корневого модуля, которая будет описана в главе 4, включающая фитили, гранульную среду, пористые трубки и другие детали, из которых вряд ли можно было извлечь полностью проросшие насквозь корни для взвешивания, вызывает необходимость в дополнительной проверке справедливости данного вывода.

Вообще же, с логической точки зрения утверждение, что "невесомость не оказывает непосредственного влияния на элементарные, генетически детерминированные биологические процессы, в том числе рост, развитие и размножение растений" (Парфенов, 1988) равнозначно утверждению, что сила тяжести не оказывает влияния на развитие любых органов, тканей и клеток растения. Действительно, если растения растут и размножаются одинаково при воздействии силы тяжести и в невесомости, то это означает, что сила тяжести не влияет на рост и развитие растений. Однако достаточно установить в наземных условиях вегетационный сосуд с растением горизонтально на несколько часов, чтобы увидеть гравитационный изгиб стебля, демонстрирующий воздействие гравитационного фактора на рост и развитие этого растения. Известно также, что форма органов, а следовательно, и рост отдельных тканей и клеток этих органов у высших растений не являются детерминированной реализацией генетической программы, но подвержены влиянию внешних факторов, в том

числе гравитационного фактора. Вместе с тем существует теоретическая возможность, что последствия от исключения гравитропических реакций в условиях невесомости у высших растений могут быть в той или иной степени компенсированы способностью к другим тропическим реакциям, так как механизмы формирования ответного сигнала на аква-, хемо- и другие стимулы на клеточном уровне практически одинаковы (Медведев, 1996). На это указывает хотя бы тот факт, что, в отличие от семян, сухая масса надземных вегетативных органов в отдельных полетных экспериментах была практически такой же, что и в наземном контроле (Сычев и др., 2002; Левинских и др., 2000, Сычев и др., 2000).

Задачей конструкторов космических оранжерей является создание для условий невесомости (микрогравитации) таких вегетационных устройств, которые позволили бы обеспечить нормальное развитие растений и высокий удельный выход полезных веществ на затраченные ресурсы за счет искусственно созданных градиентов светового поля в надземной части посева, водных потенциалов и концентраций нутриентов в корневой зоне, а возможно, и других физических или химических стимулов.

В числе динамических факторов космического полета в ряде работ было изучено влияние вибрации на растительный организм (Фишер и Шайдоров, 1976, Дадькин и Ковадло, 1976; Газенко и Кальвин, 1975). Действие вибрации в основном проявляется при транспортировке биологического материала, а также на активных участках полета космического корабля. В целом, согласно литературным данным, вибрационные и виброакустические воздействия, имеющие место в космическом корабле, не оказывают существенного влияния на продукционный процесс растений. Вместе с тем при воздействии вибрации с параметрами, типичными для двигателей ракет-носителей космического корабля (частоты до 2 кГц, виброперегрузки до 10 g в первые 120 с полета), на набухшие после 20-часового замачивания семена ели, сосны, лиственницы с частотой 10–1000 Гц в течение 20 мин при постоянной виброперегрузке 1,5 g было отмечено увеличение энергии прорастания и всхожести семян. При воздействии же вибрации на покоящиеся семена не было выявлено достоверного эффекта (Адамович и Горшенин, 1997). Вибрация с частотой 10–20 Гц при ускорении 10–15 g угнетала прорастание семян. В работе (Mortow & Wheeler, 1997) был отмечен эффект стимуляции роста листьев лука под действием вибрации. Имеются также данные о снятии в невесомости неблагоприятного действия вибрации на рост растений (Газенко и Кальвин, 1975).

Таким образом, имеющиеся в настоящее время данные доказывают возможность эффективного производства свежей витаминной зелени на борту космического корабля, однако они же свидетельствуют о необходимости нейтрализации в космической оранжерее возможных неблагоприятных изменений гравитационно-зависимых функций растений и

факторов среды обитания, а также других факторов космического полета (Беркович и др., 2002).

### **2.3. Воздействие на растения среды обитания внутри пилотируемого космического корабля**

Многочисленные эксперименты по культивированию высших растений в оранжереях наземных моделей биолого-технических систем жизнеобеспечения выявили, что продуктивность посевов в закрытых оранжереях, как правило, была ниже, чем при аналогичных условиях в открытых установках (Мелешко и др., 1994, Веселова и др., 1993). В закрытых оранжереях часто наблюдали нарушения репродукционного процесса у растений, например повышенную пустозерность в колосьях пшеницы. С аналогичной проблемой пришлось столкнуться и при выращивании растений в космической оранжерее "Свет" на борту ОК "Мир", где в ходе первого эксперимента с пшеницей были получены полностью стерильные колосья (Левинских и др., 1999; Сычев и др., 1999; Levinskikh et al., 1997). Нерегулярный характер таких изменений наводит на мысль о существовании в закрытых оранжереях не одной, а целого ряда возможных причин подобных отклонений. Безотносительно к тому, какая из конкретных причин вызывала отклонения в развитии растений в каждом из перечисленных опытов, можно согласиться с общим выводом о том, что большинство таких отклонений вызывается несовершенством конструкции вегетационного устройства, приводящим к неадекватности среды обитания растений их физиологическим потребностям (Mogrow, Wheeler, 1997). Ниже мы проанализируем некоторые из возможных причин ухудшения среды обитания в условиях космического полета. Среди таких причин в первую очередь следует назвать неадекватный состав искусственной газовой среды в гермообъемах, в том числе загрязненность ее различными примесями.

#### **2.3.1. Воздействие на растения газовой среды в космическом корабле**

Основные требования к искусственной газовой среде, создаваемой в обитаемом отсеке пилотируемого космического корабля, изложены в работах (Джеймс и Коулман, 1994; Малкин, 1994) и представлены в табл. 2.2.

Парциальное давление паров воды в кабине космического корабля согласно ГОСТу должно находиться в пределах от 0,66 до 2,66 кПа, а по некоторым данным – в диапазоне от 0,8 до 1,9 кПа (Велигора, 1994). По данным этих же работ, температура воздуха в кабине может изменяться в пределах от 17,3 до 26,4 °С. Можно отметить, что в реальном полете

иногда допускаются более широкие кратковременные колебания параметров, чем это указано в табл. 2.2, например, по температуре – до 27,7 °С.

Таблица 2.2

Основные требования к газовой среде в обитаемом отсеке пилотируемого космического аппарата

Название КК	Общее давление, кПа	Объемная концентрация кислорода, %	Объемная концентрация азота, %
“Салют”, “Мир”	97,3–118,6	19–32	66–78
“Меркурий”, “Джемини”, “Аполлон”	34	100	-
“Спейс Шаттл”	101	35–40	60–65

Для иллюстрации реальных колебаний параметров газовой среды в кабине мы приводим динамику параметров газовой среды в базовом модуле ОК “Мир” за 100 сут во время проведения 16-й орбитальной экспедиции (рис. 2.2–2.5).

Динамика температуры воздуха в базовом модуле ОК “Мир” в ходе ОЭ-16, °С

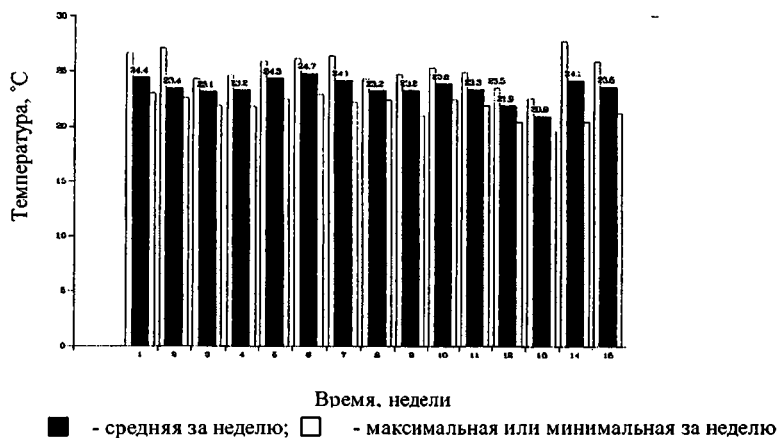


Рис. 2.2

Динамика относительной влажности воздуха в базовом модуле ОК "Мир" в ходе ОЭ-16, %

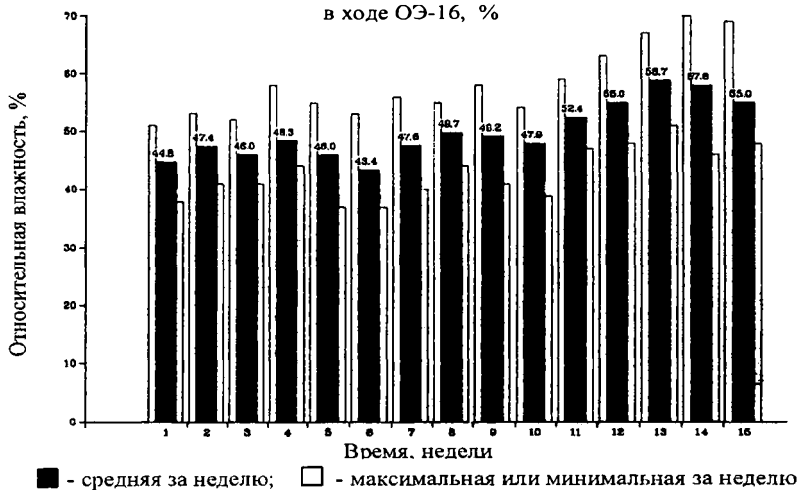


Рис. 2.3

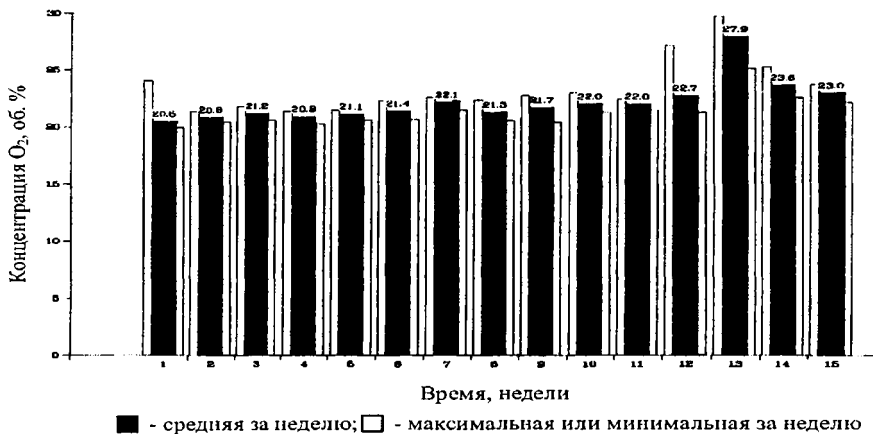


Рис. 2.4

Динамика парциального давления углекислого газа в воздухе базового модуля ОК "Мир" в ходе ОЭ-16, кПа

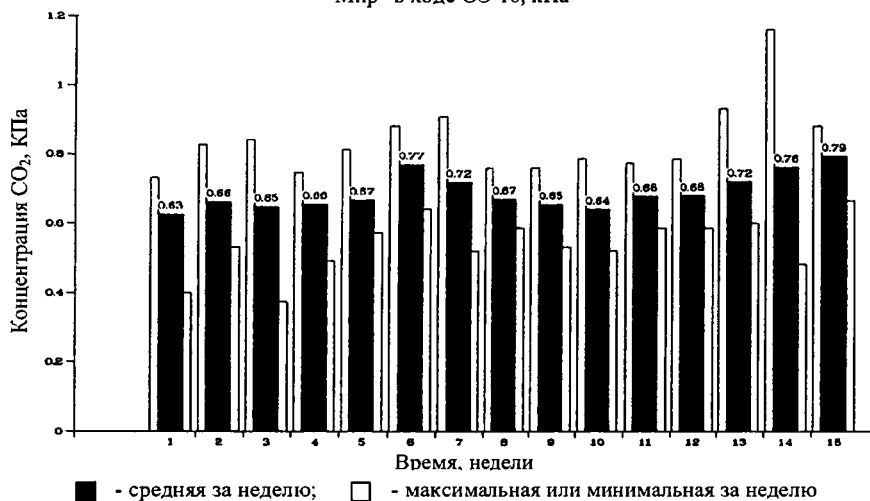


Рис. 2.5

Как было установлено, изменение общего давления в довольно широких пределах не оказало существенного влияния на вегетирующие растения. Вместе с тем снижение давления в космической оранжерее позволило уменьшить количество воздуха, необходимое для заполнения объема оранжереи, улучшить ее весовые характеристики. В 1983 г в Днепропетровском политехническом институте мы провели успешный эксперимент по выращиванию ювенильных растений пшеницы в гермообъеме с газовой средой, практически не содержащей азота, но при нормальном парциальном давлении  $O_2$  и  $CO_2$ . Общее давление газовой среды, таким образом, составляло около 20 кПа.

В результате был рекомендован способ выращивания растений в космической оранжерее при пониженном давлении (Беркович и др., 1983). Зарубежные исследователи также провели ряд исследований по культивированию посевов растений пшеницы, салата, шпината, томатов и риса при пониженном давлении (Goto, 1998; Iwabuchi et al., 1998; Andre, 1996; Corey et al., 1996; Daunich, Brinkjans, 1996; Iwabuchi et al., 1996; Andre, Massimino, 1992; Daunicht, Brinkjans, 1992). В целом было показано, что снижение давления воздушной среды за счет уменьшения содержания в ней азота слабо влияет на газообмен и рост растений как при кратковременном, так и при хроническом воздействии. Возможно, это вызвано компенсацией увеличения скорости диффузии газов в разреженном воздухе за счет уменьшения размеров и апертуры устьиц в листьях (Iwabuchi, Kurata, 1998).



Среди многочисленных компонентов газовой среды в космическом корабле три газа: кислород, углекислый газ и этилен – играют особую роль для растений, поскольку первые два являются продуктами метаболизма растений и одновременно используются ими для дыхания и углеродного питания, соответственно, а третий играет роль гормона старения (Ракитин, 1983). В табл. 2.3 приведены предельно допустимые концентрации этих газов в атмосфере пилотируемых космических аппаратов.

Концентрация кислорода в воздухе существенным образом влияет на фотосинтетическую продуктивность растений. Из физиологии растений известен эффект Варбурга, заключающийся в ингибировании фотосинтеза при повышении концентрации  $O_2$  в воздухе (Рабинович, 1951). В обзоре работ, посвященных данному вопросу, показано существование регуляторной положительной обратной связи между концентрацией кислорода в среде и функцией электронтранспортной цепи фотосинтеза в диапазоне объемных концентраций  $O_2$  от 0,2 до 2 % (Литвин и др., 1982). При более высоких концентрациях проявляется торможение на биосинтетической стадии фотосинтеза как за счет стимулирования фотодыхания, так и, по-видимому, за счет регуляторного действия  $O_2$  на ферментную систему окисления воды по типу отрицательной обратной связи. Характер изменения скорости фотосинтеза при возрастании концентрации кислорода в среде на примере микроводоросли *Chlorella* хорошо виден на рис. 2.6, заимствованном нами из работы (Рабинович, 1951).

В космической оранжерее с искусственной газовой средой эффект Варбурга обеспечивает возможность повышения продуктивности посевов за счет снижения в воздухе содержания кислорода, т.к. возрастание скорости фотосинтеза посева не сопровождается здесь повышением интенсивности дыхания. В опытах с пшеницей в герметичном фитотроне было обнаружено, что снижение парциального давления  $O_2$  в воздушной среде до значения около 9 кПа (приблизительно 9 % об.) приводило к увеличению сырого веса одного растения почти на 80 % (Chagvardieff et al., 1996). При повышении парциального давления  $O_2$  от 5 до 20 кПа в герметичной оранжерее было отмечено приблизительно линейное снижение фотосинтеза посева пшеницы (Corey et al., 1996). С другой стороны, понижение парциального давления кислорода в космической оранжерее потребует отделения ее объема от обитаемых отсеков, что неизбежно затруднит организацию воздухообмена между



оранжерей и другими отсеками и вызовет трудности при обслуживании ее экипажем. Окончательный выбор содержания O<sub>2</sub> в газовой среде нужно производить с учетом требований к космической оранжерее в конкретном космическом корабле.

Что касается углекислого газа, показано, что при повышенных концентрациях CO<sub>2</sub> в ряде случаев отмечали увеличение продуктивности растений за счет повышения квантового выхода фотосинтеза посевов (Монже, Bugbee, 1998). Максимум зерновой продуктивности пшеницы был отмечен при концентрации CO<sub>2</sub> в окружающем воздухе около 0,12 об. % (рис. 2.7), а при увеличении ее до 0,25 об. % урожай снижался на 20–30% и оставался примерно на одном уровне вплоть до концентрации 2 об. % (Bugbee, 1995). В опытах с соевыми бобами, рисом и картофелем максимальный урожай был получен при концентрации CO<sub>2</sub> в окружающем воздухе, равной от 0,1 до 0,12 об. % (100–120 Па) (Wheeler et al., 1994), другие концентрации углекислого газа в диапазоне от 0,05 до 1,0 об. % приводили к снижению урожая сои на 25–30 %, а картофеля – на 8–12 %.

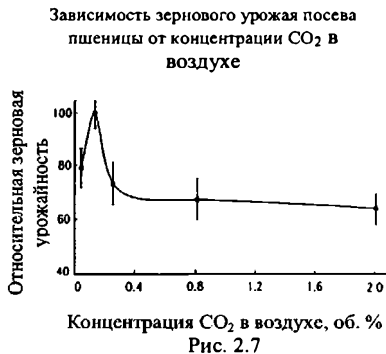


Таблица 2.3

Максимально допустимые концентрации углекислого газа и этилена в воздухе кабин космического корабля при различной длительности полета\*

Длительность полета, сут	1/24	1	7	30	60	180	360
ПДК CO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	23000	23000	13000	13000	17800–23300	13000	11550–15100
об. %	1,3	1,3	0,7	0,7	1,0–1,3	0,7	0,64–0,84
ПДК C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , мг/м <sup>3</sup>							20

\*По данным ГОСТ Р 50804-95 “Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования”. М., 1995, и из работы (Джеймс, Коулман, 1994)

Воздействие повышенных концентраций CO<sub>2</sub> на растения, как правило, приводило к усилению кущения, увеличению биомассы корней и корневого дыхания, снижению устьичного сопротивления, а также уменьшению средней массы одного семени и коэффициента хозяйственного использования биомассы (Bugbee, 1995, Wheeler et al., 1994).

Интересно отметить, что, несмотря на монотонное увеличение транспирации посевов сои и картофеля, культивируемых при возрастающих значениях парциального давления углекислого газа в воздухе в диапазоне 50-1000 Па, транспирационный коэффициент у обеих культур изменялся по унимодальной кривой с максимумом при значении 100 Па (Wheeler et al., 1994).

В литературе имеются данные о влиянии повышенных концентраций  $\text{CO}_2$  на биохимический состав растений. Так, в опытах с соей было отмечено увеличение содержания жиров в семенах и углеводов - в стеблях и листьях при парциальном давлении  $\text{CO}_2$ , равном 200 Па (Wheeler et al., 1990). В плодах томатов отмечали повышение содержания кальция по мере увеличения парциального давления  $\text{CO}_2$  в окружающем воздухе от 0,04 до 1 кПа (Madsen, 1974).

Кроме того, в опытах с растениями перца была обнаружена прямая корреляция между концентрацией углекислого газа в диапазоне 0,03-0,2 об.% и смертностью помещенных в вегетационную камеру насекомых-вредителей: трипсов, белокрылки и фруктовой мухи (Grodzinski et al., 1996). Этот эффект, однако, требует дальнейшего уточнения, так как зона токсического эффекта  $\text{CO}_2$  для этих насекомых, определенная в камерах без растений, лежит в области концентраций на 1-2 порядка более высоких. Авторы статьи предположили наличие некоторого косвенного воздействия на насекомых углекислого газа в вегетационных камерах.

При анализе воздействия углекислого газа на растения необходимо учитывать различия его содержания над посевом растений и внутри его. Поскольку фотосинтезирующая поверхность растений активно ассимилирует  $\text{CO}_2$  по всей толщине растительного слоя, то концентрация газа переменна по глубине посева. Характер изменения зависит от густоты посева, архитектуры растений, плотности потока фотосинтетически активных фотонов и других параметров среды, влияющих на фотосинтез. На рис. 2.8 представлена динамика концентраций  $\text{CO}_2$  внутри плотного (2051 растений на  $\text{м}^2$ ) посева 15-сантиметровых семян баклажан при разных значениях облученности посева (Kitava et al., 1998). Хотя в данном примере снижение парциального давления  $\text{CO}_2$  составляло всего лишь около 3 Па, в случае высокого посева с интенсивным фотосинтезом, например

Снижение парциального давления  $\text{CO}_2$  по глубине посева семян баклажан при различных уровнях освещенности

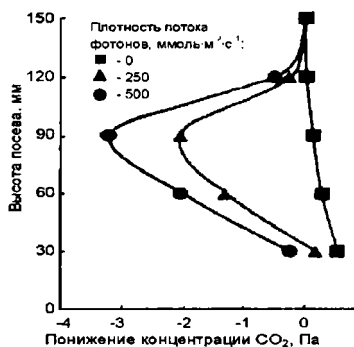


Рис. 2.8

лишь около 3 Па, в случае высокого посева с интенсивным фотосинтезом, например

загущенного посева пшеницы под мощным освещением, такое снижение может достигать десятков и даже сотен Па.

Сопоставление оптимальных для растений концентраций углекислого газа в воздухе с реальным содержанием  $\text{CO}_2$  на борту орбитальной станции "Мир" (рис. 2.5) показало, что в бортовые концентрации  $\text{CO}_2$  были, как правило, сверхоптимальны для растений. В ходе специальных экспериментов с зерновыми и овощными культурами было показано, что повышенные концентрации  $\text{CO}_2$  в растениях стимулировало образование эндогенного этилена, которое достигало максимальной скорости при концентрациях около 2 об.% (Bugbee, 1995). Этилен вызывал у растений снижение репродуктивной функции, в частности, у пшеницы отмечали ингибирование образования пыльцы и появление дефектных пыльцевых зерен. Другими словами, действие избыточных концентраций углекислого газа на растения опосредовано действием этилена, часто выступающего как загрязнитель воздуха (Corey et al., 1996).

Известно, что этилен в герметичных космических оранжереях может выделяться как элементами конструкции, например, пуско-регулирующей аппаратурой газоразрядных ламп, так и продуцироваться самими растениями, в частности, в стрессовых ситуациях. Данный газ, являясь важным фитогормоном растений, оказывает регуляторное действие на рост стебля, эпинастию листьев, образование цветков, опадение листьев и созревание плодов (Abeles et al., 1992; Mattoo, Suttle, 1991). Действие этилена на растения в большинстве случаев проявляется при концентрации его в воздухе от 0,1 до 10 ppm, или 0,12-12,5 мг/м<sup>3</sup> (Wheeler et al., 1996, Corey et al., 1996). Реальное измерение концентраций этилена на борту орбитальной станции "Мир" показало значения от 0,3 до 1,8 мг/м<sup>3</sup>, что могло явиться причиной (или одной из причин) пустозерности и аномально интенсивного кущения суперкарликовой пшеницы в ходе бортового эксперимента в космической оранжерее "Свет" (Сычев и др., 2000). Аналогичные отклонения впоследствии были обнаружены в наземных опытах по выращиванию карликовой пшеницы, сорт USU-Apogee, в газовой среде с повышенным содержанием этилена (Klassen et al., 1999). Зависимости показателей роста и продуктивности посева пшеницы от концентраций этилена в воздухе, взятые из этой книги, представлены на рис. 2.9.

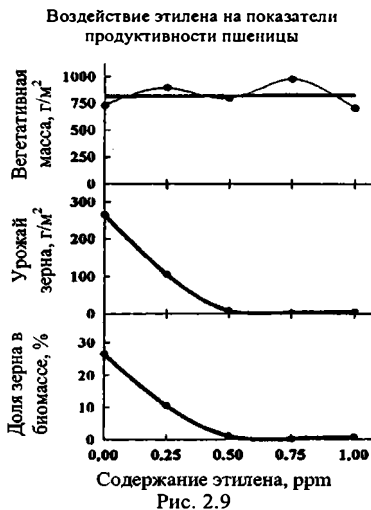
Таким образом, для длительного надежного выращивания растений на борту в космических оранжереях желательно обеспечить очистку воздуха, поступающего из обитаемых отсеков в вегетационную камеру, от целого ряда загрязнителей. В частности, концентрация этилена в оранжереях для выращивания зерновых культур не должна превышать 50 частей на миллиард (ppb). Кроме того, оптимальное давление и состав газовой среды в оранжерее могут отличаться от таковых в гермокабине космического корабля.

### 2.3.2. Воздействие на растения загрязнителей газовой среды

В данном разделе мы будем рассматривать воздействие на растения только газообразных загрязнителей воздуха, поскольку данные о влиянии на растения аэрозолей и механических частиц, присутствующих в газовой среде в отсеках космического корабля в штатном режиме, в настоящее время в литературе не найдены.

Источниками газовых выделений в гермокабинах являются как живые организмы, включая человека, так и технические системы космического корабля. По различным оценкам номенклатура газообразных выделяющихся веществ в обитаемых гермокабинах составляет от нескольких десятков до нескольких сотен наименований (Batten et al., 1996; Wheeler et al., 1996; Batten et al., 1995; Нольде и др., 1983; Савина, Кузнецова, 1980; Терсков и др., 1979; Кустов и Тиунов, 1969). Среди газообразных метаболитов растений найдены, например, терпены, спирты, сложные эфиры, альдегиды, кетоны, а также этилен и ряд других газов. В составе газообразных выделений человека обнаружены окись углерода, окислы азота, аммиак, водород, сероводород, метан, летучие жидкие кислоты, альдегиды и широкий спектр летучих углеводородов. Таким образом, растения в обитаемых гермокабинах находятся в постоянном двустороннем взаимодействии с газовой средой: с одной стороны, они сами влияют на формирование газового состава атмосферы, а с другой – непрерывно испытывают воздействия со стороны загрязнителей воздушной среды и частично поглощают их. Отсюда вытекает двойственность функций высших растений по отношению к газовой среде в гермокабине: во-первых, растения могут очищать среду от ряда газовых примесей техногенного или антропогенного происхождения, а во-вторых, изменяя рост и развитие под воздействием тех или иных компонентов газовой среды, могут являться индикатором ее загрязнения. Очевидно, что проблема оценки воздействия газообразных компонентов на высшие растения важна как с точки зрения прогнозирования производительности и надежности космической оранжереи, так и для выявления требований к системе очистки воздуха в ней.

В ряде монографий приведена обширная библиография по проблеме газоустойчивости растений к основным промышленным загрязнителям воздуха, таким как



диоксид серы, сернистый ангидрид, фтористый водород, хлористый водород, хлор, соединения свинца, окислы азота (нитрозные газы), окись углерода, сероводород, аммиак и некоторые углеводороды (Смит, 1985; Дресслер, 1981; Николаевский, 1979; Гудериан, 1979; Илькун, 1978). В ходе многолетних наблюдений за состоянием древесно-кустарниковых пород, травяного покрова и сельскохозяйственных насаждений в районах промышленных предприятий, а также специальных экспериментов по фумигации отдельных видов растений было выяснено, что действие вредного вещества на растение зависит как от вида и концентрации токсиканта, а также длительности его воздействия, так и от степени газоустойчивости растений к тому или иному реагенту. Газоустойчивость растений, в свою очередь, обусловлена целым рядом причин как внутреннего (видовые особенности растений, стадия онтогенеза в период воздействия), так и внешнего характера (условия корневого питания, метеорологические факторы, сезон и время суток в период воздействия токсиканта). Газоустойчивость растений связана обратной зависимостью с интенсивностью фотосинтеза. Считают, что эта зависимость обусловлена скоростью поглощения токсических газов через устьица фотосинтезирующих органов, количество и степень открытия которых обычно коррелирует с величиной фотосинтеза. Отсюда следует, что на газоустойчивость растений влияет и режим освещения растений.

Следует отметить, что в настоящее время фитотоксикология как самостоятельная научная дисциплина еще находится в процессе становления и понятие предельно допустимых норм для растений понимается неоднозначно разными исследователями. В литературных источниках предложено несколько терминов для оценки степени повреждения растений атмосферными загрязнителями: острое, хроническое, скрытое, катастрофическое, и т.д. Однако определения предложенных терминов представляются неоднозначными, так как в зависимости от вида растения и отводимой ему роли в системе жизнеобеспечения человека, а также в зависимости от выбранных показателей состояния растений и методов анализа одни и те же повреждения могут быть названы любым из этих терминов. Более определенным является термин "повреждение растения газами и дымами", подразумевающий любые отрицательные последствия воздействия загрязненного воздуха на растения, независимо от того, являются ли они следствием временного процесса адаптации растений или носят необратимый характер (Дресслер, 1981).

В качестве критериев степени угнетения растений могут быть использованы также экономические или экологические аспекты. Предложено, например, считать основным критерием предельно допустимой для растений нормы загрязнения воздуха снижение скорости фотосинтеза растений на 10% по сравнению с растениями в чистой воздушной среде (Николаевский, 1979). На практике этот показатель определяли следующим образом:

отделенные от растения листья быстро помещали в освещаемые камеры с различной концентрацией газообразного загрязнителя и в камеру с чистым воздухом на срок от 5 до 20 мин и затем в 3–4-кратной повторности определяли снижение фотосинтеза после экспонирования. Далее строили зависимости снижения фотосинтеза от концентрации газа для различных видов и времен года. Были измерены концентрации газа, вызывающие 10 %-е уменьшение скорости фотосинтеза, у 8 видов древесных и газонных пород, и наименьшее из этих значений предлагалось в качестве максимально-разовой предельно допустимой для растений нормы загрязнения воздуха данным поллютантом. Однако, по нашему мнению, эта методика не позволяет надежно прогнозировать степень повреждения растений загрязнителем даже при кратковременных разовых воздействиях, так как переходный процесс снижения скорости фотосинтеза может иметь колебательный характер и, следовательно, измеренное разовое значение будет зависеть от фазы этого процесса, а длительность переходного процесса фотосинтеза в срезанном листе может быть соизмерима с периодом, в течение которого в нем обнаруживается снижение тургора, разрушение пигментов и другие необратимые процессы (Беркович и Следь, 1989).

Важно отметить, что чувствительность растений ко многим загрязнителям воздуха оказывается существенно более высокой, чем у человека и животных. Более того, ранжированный ряд токсичности исследованных газов, по крайней мере, для некоторых растений, оказывается почти полностью противоположным таковому для животных и человека, что создает определенные трудности в определении предельно допустимых концентраций газовых загрязнителей воздуха в гермообъекте, где предполагается культивирование растений. Отсутствие общепринятых и достаточно обоснованных предельно допустимых норм загрязнения атмосферы применительно к высшим растениям привело к значительному расхождению оценок предельных норм загрязнения воздуха для растений по ряду токсиантов. Для разработки методики определения порогов фитотоксического действия (ПФД) газовых загрязнителей для растений в условиях обитаемых гермообъектов необходимо учесть дополнительно следующие особенности функционирования в них растительных организмов.

1. Функции, возлагаемые на растения в конкретном объекте, а также сроки функционирования космической оранжереи с растениями на борту космического корабля могут выбираться в широких пределах и определяются конкретной рабочей программой. Вследствие этого, основным критерием для выбора ПФД для растений должно служить ухудшение именно тех функциональных характеристик посева, которые необходимы для выполнения соответствующей программы. Например, если в конкретной программе растениям отводится роль источника пищевой биомассы в течение одной вегетации, то ПФД

загрязнителя должна в первую очередь гарантировать заданную продуктивность растений и характеристики качества съедобной биомассы: допустимое содержание витаминов, нитратов, органолептические свойства и т.д. Отсюда ясно, что соответствующие ПФД загрязнителей, как и при нормировании среды человека, должны быть различными для различных сроков функционирования космической оранжереи. В частности, надо различать ПФД при разовых воздействиях поллютантом, обычно в течение периодов порядка десятков минут, от ПФД при длительностях работы оранжереи в кабине до месяца, до полугода и т.д.

2. ПФД загрязнителя воздуха для растений в принципе может допускать частичное повреждение их отдельных органов или систем. Для предыдущего примера это значит, что при воздействии ПФД токсиканта может ухудшаться репродуктивная способность или нарушаться газообмен растений и другие показатели, не влияющие непосредственно на количество и качество съедобной биомассы в конце первой вегетации.

3. Рекомендуемый ПФД загрязнителя воздуха для растений в космической оранжерее не должен превышать значение соответствующего показателя ПДК (предельно допустимое количество) для людей, находящихся в том же космическом корабле. В противном случае понадобились бы специальные защитные средства для человека при работе в оранжерее, что затруднило бы обслуживание ее экипажем.

С учетом перечисленных требований мы предложили критерий ПФД для посевов растений в космической оранжерее в следующем виде: снижение ассимиляции углекислоты посевом, экспонированным в загрязненной газовой среде, за период от начала фумигации растений до уборки урожая или хотя бы за период, на порядок превышающий длительность фумигации, не должно превышать заданной фиксированной доли (например, 10 %) по сравнению с аналогичным посевом в чистом воздухе (Беркович и Следь, 1989, Беркович и др., 1990). Математически этот критерий можно записать следующим образом:

$$\frac{\int_0^T (F_k - F_{пфд}) dt}{\int_0^T F_k dt} = X, \quad (2.1)$$

где  $F_k$  – скорость видимого фотосинтеза контрольного посева,  $F_{пфд}$  – скорость видимого фотосинтеза посева, подвергнутого воздействию загрязнителем при концентрации его, равной ПФД, в течение периода  $\tau$ ,  $t_\phi$  – возраст растений в момент начала фумигации,  $T$  – возраст растений в конце вегетации,  $t$  – текущее время,  $X$  – доля снижения ассимиляции углекислоты по сравнению с контрольным посевом (в чистом воздухе);  $0 \leq X \leq 1$ ; в наших опытах принималось:  $X = 0,1$ .



Динамика разности между фотосинтезом контрольного 28-дневного посева (Фк) и фотосинтезом посевов, подвергшихся 2 ч экспозиции в атмосфере с различным содержанием аммиака (Ф)

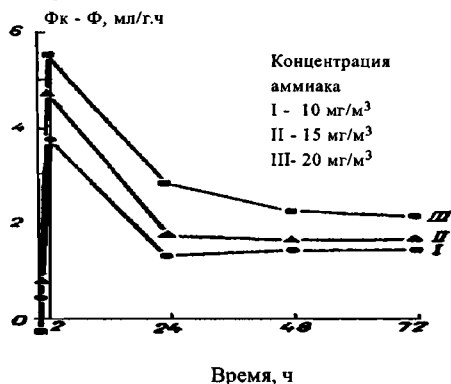


Рис. 2.10

Диаграмма потерь фотосинтетической продуктивности растений салата в результате 2 ч экспозиции в атмосфере с различным содержанием аммиака



Рис. 2.11

Для листовых овощных культур интегральный фотосинтез за время вегетации практически пропорционален урожаю, поэтому предложенный критерий равнозначен условию 10-процентного снижения урожая под воздействием загрязнителя. Предложенный критерий был применен нами для оценки влияния газообразного аммиака (непрерывный компонент газовой среды в обитаемых гермокабинах) в концентрации, равной ПФД, на растения салата (Беркович и Следь, 1989; Беркович и др., 1990). Следуя рекомендациям классической токсикологии (Саночкин и Уланова, 1975), для проверки пороговых эффектов, кроме скорости фотосинтеза, были параллельно использованы и другие, более частные показатели, например, характеризующие действие аммиака на весьма чувствительную систему энергообеспечения зеленого растения. В качестве таких параметров использовали скорость фотосинтетического электронного транспорта, скорость реакции Хилла с 2,6-дихлорофенолиндофенолом в качестве акцептора в суспензии хлоропластов листьев, а также степень энергизации мембран хлоропластов при освещении листа (Верховский и др., 1984). Было обнаружено, что эти показатели после фумигации растений имеют сходную динамику. Отметим также, что такие характеристики качества биомассы растений салата, как содержание аскорбиновой кислоты и нитратов в листьях, в наших экспериментах слабо изменялись при варьировании содержания аммиака в воздухе. Полученные данные позволили считать предложенный критерий (2.1) достоверным для определения ПФД в описанном случае.

В качестве примера на рис. 2.6 отображена динамика полученной разности между фотосинтезом контрольного и опытных 28-дневных посевов салата, а на рис. 2.10 приведена диаграмма, иллюстрирующая значения соотношения интегралов в левой части уравнения (2.1) для различных концентраций аммиака, воздействующих на опытные посевы салата. Результаты получены с помощью численного интегрирования по экспериментальным точкам, обозначенным на рис. 2.11. Следуя критерию (2.1), ПФД аммиака при его разовом 2-часовом воздействии на 28-дневный посев растений салата может быть принят равным 20 мг/м<sup>3</sup>. Для нахождения ПФД исследуемого газа на растения потребовалось поставить серию опытов по фумигации растений на наиболее газочувствительных стадиях онтогенеза при длительности от десятков минут до хронического воздействия. В целом, на основе экспериментальных результатов нами было установлено, что ПФД аммиака, входящего в состав воздушной среды оранжерей, в зависимости от продолжительности его воздействия составляет:

- при 2-часовой экспозиции – 20 мг/м<sup>3</sup>;
- при 4-часовой экспозиции – 5 мг/м<sup>3</sup>;
- при хроническом воздействии (62 дня) – менее 2 мг/м<sup>3</sup>.

Сравнивая найденные значения ПФД со значениями максимально допустимых концентраций аммиака в воздухе кабин американских и российских космических кораблей, приведенных в табл. 2.4, отметим, что для надежного функционирования на борту космических оранжерей необходимо предусмотреть фильтр аммиака для очистки воздуха, поступающего к растениям из отсеков космического корабля. Такие фильтры были применены в дальнейшем в составе аппаратуры КО “Свет” и “Витацикл”.

Таблица 2.4

Максимально допустимые концентрации аммиака в воздухе кабин космических кораблей при различной длительности полета\*

Длительность полета, сут	1/24	1	7	15	30	30	60	90	180	180	360
ПДК, мг/м <sup>3</sup>	20	14	7	5	7	2	2	1	7	1	1
№ лит. источника в списке	148	148	148	162	148	162	162	162	148	162	162

\*Взято из ГОСТ Р 50804-95 “Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования”. М., (1995); работы Джеймс и Коулман (1994).

### 2.3.3. Воздействие на растения колебаний температуры и влажности воздуха, а также скорости воздушного потока

В природных условиях многие виды высших растений толерантны к изменениям температуры воздуха в достаточно широких пределах. Обычно выделяют 5 зон температурного диапазона при вегетации растений: фоновую (оптимальную для растений), верхнюю и нижнюю закалывающие и верхнюю и нижнюю повреждающие (Дроздов и др., 1984). Границы этих зон специфичны для каждого вида и сорта и к тому же зависят от других условий выращивания. Адаптационные изменения фотосинтеза растений (закалывание) наблюдали, например, при резком снижении температур с 30-20 °С до 10-5 °С или при повышении с 18 °С днем и 14 °С ночью до 27 °С днем и 23 °С ночью (Кислюк и Палеева, 1990). Зафиксирован также случай, когда зеленые листья не погибали и даже не меняли окраску при 15-минутном воздействии температуры 50-52 °С (Веселова и др., 1993). Влияние температуры на газообмен растений пшеницы в условиях замкнутой фитокамеры в фоновой зоне температурного диапазона хорошо иллюстрирует рис. 2.12 (Wheeler et al., 1993). Максимум нетто-фотосинтеза посева пшеницы был отмечен при температуре 20 °С, а темновое дыхание монотонно увеличивалось с ростом температуры в диапазоне от 16 до 24 °С. Таким образом, видимый фотосинтез и продуктивность посева снижались при увеличении температуры выше 20 °С. Зерновая продуктивность карликовой пшеницы, выращиваемой при 14-часовом фотопериоде и уровне фотосинтетически активной радиации над посевом 200 Вт/м<sup>2</sup>, уменьшилась более чем в 3 раза за счет резкого повышения стерильности цветков при изменении температуры воздуха в вегетационной камере с 17 до 27 °С, а при постоянном освещении снижение урожая составило всего 13 % (Salisbury, Bugbee, 1988). Авторы рекомендовали поддерживать температуру в фитокамере с пшеницей не выше 25 °С. Весьма существенно влияет температура воздуха на урожай картофеля. На основании результатов опытов с двумя сортами картофеля, выращенными в закрытых фитотронах при непрерывном освещении, были получены регрессионные уравнения урожайности в зависимости от облученности посева, концентрации CO<sub>2</sub> и температуры (Yandell et al., 1988). Согласно этим уравнениям, урожайность клубней снижалась примерно на треть при повышении температуры от 17,5 до 22 °С. С учетом монотонности зависимости темнового дыхания, при периодическом режиме освещения посева растений в фитокамере рекомендуется снижать ночную температуру

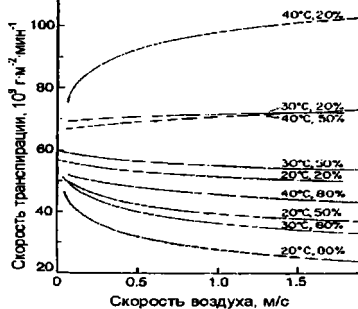
Влияние температуры воздуха на газообмен пшеницы в замкнутой фитокамере



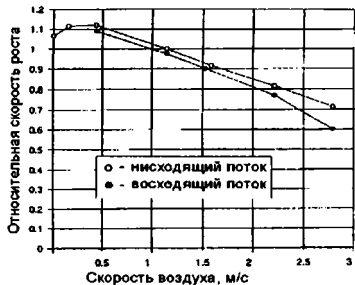
Рис. 2.12

воздуха (Wheeler et al., 1993; Salisbury, Bugbee, 1988). Ранее проведенное нами исследование оптимальных температур воздуха в многомерной дискретной поисковой системе оптимизации фотосинтетической продуктивности посева пшеницы выявило существенный дрейф этого показателя с возрастом растений (Беркович, 1981, Малиновский и др., 1984). На основании полученных данных параметры среды обитания в фитокамерах, в том числе температуры воздуха, корректировали с учетом фазы онтогенетического развития растений (Salisbury, Bugbee, 1988, Wheeler et al., 1993). Таким образом, в общем случае оптимальный температурный режим в космической оранжерее не является константным, а должен задаваться в виде функции времени и, следовательно, должен отличаться от температуры воздуха в гермокабине космического корабля.

Зависимость скорости транспирации листа от скорости, температуры и влажности воздуха при облученности  $800 \text{ Вт/м}^2$



Зависимость скорости роста листьев томатов от скорости воздушного потока в посевах



Температурный режим растений существенно связан также с условиями теплообмена внутри оранжерей, которые, в свою очередь, зависят от водного потенциала воздуха и организации воздушных потоков (Spomer et al., 1997). Водный потенциал  $\psi$  связан с относительной влажностью воздуха следующим соотношением:

$$\psi = [RT \ln(\phi/100)] \cdot V_a, \quad (2.2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура,  $\phi$  – относительная влажность воздуха в %,  $V_a$  – молярный объем воды, в  $\text{см}^3/\text{моль}$ ,  $\psi$  – в Па.

Потенциал воды в воздухе определяет величину испарения с поверхности листьев и корнеобитаемой среды, его величина при реальных значениях относительной влажности воздуха в кабине космического корабля и в оранжерее обычно много меньше, чем водный

потенциал в корнеобитаемой среде. Скорость воздушного потока и влажность в прилистовом слое воздуха сильно влияют на транспирацию, коэффициент теплоотдачи и температуру листа, что продемонстрировано на рис. 2.13 (Downs, Krizek, 1997). Как показано на рис. 2.14, скорость ростовых процессов в посеве была максимальной в диапазоне скоростей воздушного потока в фитокамере от 0,1 до 0,5 м/с. Таким образом, требования по кондиционированию воздуха в космической оранжерее должны быть более жесткими, чем в других модулях космического корабля.

#### 2.3.4. Воздействие на растения изотопного состава воды

Работы по исследованию изменения изотопного состава воды в некоторых регенеративных блоках системы жизнеобеспечения пилотируемой ОК "Мир", проведенные в ИМБП, обнаружили тенденцию постепенного снижения в регенерированной на борту воде концентрации тяжелого стабильного изотопа водорода – дейтерия (Синяк и Григорьев, 1996; Синяк и Гайдадымов, 1994).

Известно, что вода, в состав которой входит дейтерий (тяжелая, или дейтериевая, вода,  $D_2O$ ), проявляет токсические свойства. Установлено, в частности, что плоские черви вида планария макулета погибали за 1–2 ч пребывания в дейтериевой воде, а для головастиков и мальков 40-часовое пребывание в 30 %-й дейтериевой воде оказывалось смертельным. При замещении дейтерием 30–35 % атомов легкого стабильного изотопа водорода – протия – в питьевой воде у собак, мышей и крыс наступали необратимые физиологические нарушения и смерть (Sinyak et al., 2003; Синяк и др., 1998). Токсическое действие дейтерия на высшие растения также было многократно показано в экспериментах (Sinyak et al., 2003; Синяк и др., 2000; Sinyak et al., 1999). У большинства исследованных видов семена теряли всхожесть при замачивании их в воде с концентрацией  $D_2O$ , равной 50–80 %; семена наиболее устойчивых видов – пшеницы и подсолнечника – теряли всхожесть в воде с 100 %-й концентрацией  $D_2O$ . При замачивании семян салата в воде с повышенным содержанием дейтерия, наряду с уменьшением всхожести семян, наблюдали появление поврежденных и аномальных проростков. Поврежденные проростки не имели первичного корня, на его месте развивался некроз ткани (Синяк и др., 2000). Одноклеточные водоросли замедляли рост и развитие клеток по мере повышения концентрации дейтерия в воде. Клетки водоросли *Scenedesmus* sp. прекращали рост при концентрации  $D_2O$ , равной 38,5 % (Strain et al., 1961). Фотосинтетическая активность водоросли *Chlorella* sp. при культивировании в тяжелой воде снизилась в 3,7 раза по сравнению с активностью в обычной воде (Синяк и др., 2000). Влияние повышенных концентраций дейтерия на активно растущие растения было выражено как в угнетении роста и замедлении онтогенетического развития, так и в

появлении целого ряда морфологических и анатомических изменений. Было показано, что токсическое действие  $D_2O$  на растения обусловлено ингибированием митозов растительных клеток. В настоящее время считается, что любое количество дейтерия является нежелательным для животных, растений и человека (Синяк и Гайдадымов, 2003).

Если токсикологических исследований тяжелой воды высоких концентраций проведено немало, то работ по исследованию биологической активности бездейтериевой воды крайне мало. К настоящему времени наиболее исследовано воздействие талой снеговой воды на живые организмы, концентрация дейтерия в которой считается на 25 % ниже обычной. В ходе специальных экспериментов было выявлено повышение ее биологической активности (Родимов, 1961; Родимов, 1962). Было показано также, что вода, в которой концентрация дейтерия на 65 % меньше по сравнению с дистиллированной минерализованной водой, обладает противоопухолевыми свойствами (Синяк и др., 2003). У мышей, получавших воду с пониженным содержанием  $D_2O$ , отмечали достоверное торможение роста опухоли на 13, 15, 23, 26-е и 28-е сутки после перевивки карциномы легких Льюис, а продолжительность их жизни была на 10 % выше по сравнению с животными, получавшими дистиллированную минерализованную воду. Японские перепела, содержащиеся на воде с пониженным на 80 % содержанием дейтерия, отличались от перепелов, получавших дистиллированную воду, более быстрым прибавлением веса и более развитыми репродуктивными органами, а также более высокой оплодотворенностью яиц и выживаемостью выведенных из них птенцов (Синяк и др., 1998). Полученные данные по влиянию пониженных концентраций дейтерия в воде на высшие гетеротрофы убедительно обосновывают необходимость получения бездейтериевой воды на борту пилотируемых космических кораблей, в частности в условиях космических полетов по марсианской программе, которые будут проходить в условиях повышенных радиационных воздействий на экипаж. Использование экипажем питьевой воды с пониженным содержанием дейтерия, которая может быть получена в регенерационных системах жизнеобеспечения, может явиться действенным методом снижения онкологического риска, вызванного облучением космонавтов (Синяк и др., 2003).

В случае, если вода с пониженным содержанием дейтерия будет получена на борту в достаточном количестве, она может быть использована и для водообеспечения растений, выращиваемых в космической оранжерее, что делает актуальным изучение ее влияния на растения. Таких работ к настоящему времени выполнено немного, но практически все проведенные исследования выявили стимуляцию роста растений при пониженных концентрациях дейтерия в поливной воде. Так, при замачивании семян пшеницы в талой воде (20–25 %-е уменьшение концентрации дейтерия по сравнению с обычной водой)

зерновая продуктивность возросла на 41 %, а урожайность редиса при регулярном поливе талой водой возросла на 230 % (Родимов, 1961; Родимов, 1962). У двух видов высших растений: арабидопсиса *Arabidopsis thaliana* L. и гибридной листовой горчицы *Brassica rapa* L. отмечали увеличение биомассы растений и семенной продуктивности при поливе водой с пониженным на 60 % содержанием дейтерия (Синяк и др., 2000). Семенная продуктивность одного растения арабидопсиса была в среднем в 2,2 раза больше при поливе водой с уменьшенным содержанием дейтерия по сравнению с контролем. Выращивание арабидопсиса на воде с пониженным на 82 % содержанием дейтерия привело к увеличению семенной продуктивности в 2,28 раза по сравнению с посевом, выращенным на обычной дистиллированной воде (Sinyak et al., 1999). Важно отметить, что при повторном посеве семян, полученных ранее на воде с пониженными концентрациями дейтерия, отмечено усиление положительного воздействия "легкой" по водороду воды на продукционные показатели растений (Синяк и др., 2000). Хотя исследования по изучению влияния на растения "бездейтериевой" воды только начаты, полученные результаты позволяют предположить, что вода с пониженным содержанием дейтерия может использоваться в оранжерейных устройствах для улучшения условий культивирования зеленых культур на борту и получения витаминной продукции с улучшенными качествами (Синяк и Гайдадымов, 2003).

В заключение данного раздела отметим, что в числе особенностей среды на космическом корабле называют и отличные от наземных магнитные, электромагнитные и электростатические поля. Характеристики и возможное влияние их на растения рассмотрены в литературе (Адамович и Горшенин, 1997; Gorgolewski, 1996; Мелешко и Шепелев, 1994, Газенко и Кальвин, 1975,). В ряде работ приведены результаты воздействия искусственного магнитного поля на растения в условиях микрогравитации, обнаруживающие явление магнитотропизма (Nechitailo, Mashinsky, 1993; Dycus, Shultz, 1964). Однако подобные опыты проводились при напряженности магнитного поля, многократно превышающей естественное поле внутри космического корабля. С другой стороны, наши многолетние наземные параллельные эксперименты с растениями в металлических и пластиковых герметичных фитотронах, где электрические и магнитные поля заведомо были различными, не выявили систематических отклонений в росте и развитии растений. В целом, имеющиеся в настоящее время данные вряд ли дают оснований рекомендовать искусственную коррекцию электрических и магнитных полей при выращивании растений в условиях космического полета.

## ГЛАВА 3. КОСМИЧЕСКИЕ ОРАНЖЕРЕИ КАК ОБЪЕКТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### 3.1. Постановка задачи проектирования космических оранжерей

В общем случае задачу проектирования космической оранжереи, т. е. создания конкретной ее структуры, можно отнести к классу задач многокритериальной оптимизации с неполным описанием объекта (Растрингин, 1974). Конструкция оранжереи в значительной степени определяется характером космической миссии и ресурсами космического корабля, для которого она предназначена. Перед проектированием должны быть сформулированы: для научно-исследовательских оранжерей – характер и длительность предполагаемых исследований, для производственных оранжерей – видовой состав посева, продуктивность каждой из предполагаемых культур, необходимая циклограмма получения урожая и требуемый срок работы. Кроме того, должны быть заданы исходные данные, определяющие предельные значения выделяемых для оранжереи бортовых ресурсов:

- мощность энергопотребления;
- потребление и параметры теплоносителя (хладагента) из бортовых систем;
- водопотребление из запасов;
- потребление углекислого газа из воздуха гермокабины;
- расход питательных солей или почвозаменителей из запасов;
- расход семян из запасов;
- габаритные размеры;
- масса космической оранжереи;
- трудозатраты экипажа.

Для согласования космической оранжереи с бортовыми системами важно определить выделяемые оранжереей в среду потоки энергии и веществ, а также информационные потоки. В частности:

- тепловлаговыведение в газовую среду и в систему термовлагорегулирования (СТВР) гермокабины;
- объем несъедобной биомассы;
- производительность по кислороду;
- объем и циклограмму потоков накапливаемой на внешних носителях или передаваемой по телеметрическим каналам информации.

#### 3.1.1. Постановка задачи оптимизации конструкции космических оранжерей

Согласно теории потенциальной эффективности, за наиболее общий критерий оптимальности работы оранжереи для пилотируемого космического корабля, взаимодействующей с внешней



средой с заданными свойствами, можно принять выражение, характеризующее предельно выгодный обмен (Флейшман, 1977):

$$u_0 = \min u (v, H, E), \quad (3.1)$$

где  $u$  – количество бортовых ресурсов, потребляемых в оранжерее, обозначенной как система  $H$ , из среды гермокабины корабля, обозначенной как система  $E$ , для производства в ней количества ресурсов, равного  $v$ .

В настоящее время разработаны различные методики оптимального синтеза технологической структуры системы жизнеобеспечения, применимые и для проектирования космических оранжерей (Менькин, 1999). В процессе проектирования обычно выделяют четыре основных этапа:

- 1) формирование модели эффективности, включающей множество количественных и качественных критериев системы;
- 2) формирование дискретного множества альтернативных вариантов структуры объекта в заданной области допустимых значений параметров;
- 3) анализ эффективности вариантов по определенному алгоритму;
- 4) выработка рекомендаций по составу структуры объекта, как правило, с учетом неопределенности в исходной информации.

Глобальные критерии эффективности, или критерии оптимизации, применяемые для проектирования и оценки технологической структуры системы жизнеобеспечения, могут быть использованы и при оценках характеристик биорегенеративных систем жизнеобеспечения с высшими растениями, например приведенная масса или стоимость (Bartsev et al., 1997a; Bartsev et al., 1996b; Беркович, 1990; Drysdale, 1996; Drysdale, 1998; Bartsev et al., 1996a; Bartsev et al., 1997b; Bartsev, 1997; Bartsev et al., 1996c; Drysdale et al., 1999; Cuello et al., 1998; Cuello et al., 1999). Масса оранжерей, наряду с энергоемкостью и потреблением других бортовых ресурсов, определяет ее приведенную, или эквивалентную, массу. Показатель «приведенная масса» в применении к звену высших растений в биорегенеративной системе жизнеобеспечения первоначально включал в себя массу оранжерей с запасами расходных веществ, материалов и запасных элементов на определенное время функционирования, массу источника энергии с вспомогательным оборудованием, массу системы термовлагорегулирования (Чучкин и др., 1975). В дальнейшем в понятие эквивалентной массы стали включать и другие ресурсы, приведенные к единицам массы через эмпирические или расчетные коэффициенты, зависящие от структуры и уровня технической реализации звеньев системы жизнеобеспечения, а также от длительности и характера космической экспедиции, например трудозатраты на обслуживание оранжерей и длительность надежной работы бортового оборудования (Drysdale et al., 1992; Oppenheimer, 1978; Drysdale et al., 1999; Drysdale, 2001; Jones, 2001;

Maxwell и Drysdale, 2001). В наиболее полной форме эквивалентная масса системы определяется как сумма пяти составляющих (Levri et al., 2000):

- собственно массы;
- объема;
- энергопотребления;
- отводимого тепла (тепловыделения);
- трудозатрат экипажа.

Учет последнего фактора – вклада трудозатрат экипажа в эквивалентную массу системы жизнеобеспечения – производится по особой методике, отличной от методики учета других факторов. Поэтому полную эквивалентную массу системы целесообразно представить в виде двух составляющих:

$$ESM_{TOTAL} = ESM_{NCT} + ESM_{CT}. \quad (3.2)$$

где  $ESM_{NCT}$  – эквивалентная масса системы без учета трудозатрат экипажа,  $ESM_{CT}$  – вклад в эквивалентную массу системы, учитывающий полные трудозатраты экипажа на систему жизнеобеспечения. Будем обозначать индексом  $i$  отдельные подсистемы систем жизнеобеспечения. Тогда обе составляющие эквивалентной массы системы можно представить как суммы эквивалентных масс отдельных подсистем жизнеобеспечения:

$$ESM_{NCT} = \sum ESM_{NCT, I}, \quad (3.3)$$

$$ESM_{CT} = \sum ESM_{CT, I}. \quad (3.4)$$

Составляющие  $ESM_{NCT, i}$  и  $ESM_{CT, i}$  для подсистем жизнеобеспечения рассчитывают по следующим формулам:

$$ESM_{NCT, I} = M_i + \gamma_V \times V_i + \gamma_P \times P_i + \gamma_C \times C_i, \quad (3.5)$$

$$ESM_{CT, I} = \gamma_{CT} \times t_{LSS, i}. \quad (3.6)$$

Здесь  $M_i$  – масса (включая и переменную во времени составляющую)  $i$ -той подсистемы,  $V_i$  – объем, занимаемый  $i$ -той подсистемой;  $P_i$  – энергопотребление  $i$ -той подсистемы;  $C_i$  – необходимая для  $i$ -той подсистемы мощность охлаждения;  $t_{LSS, i}$  – время работы экипажа, необходимое для обслуживания  $i$ -той подсистемы СЖО;  $\gamma_V$ ,  $\gamma_P$ ,  $\gamma_C$ ,  $\gamma_{CT}$  – коэффициенты, отражающие стоимость единицы гермообъема, энергии, отводимого тепла и трудозатрат экипажа в терминах эквивалентной массы. Обычно эти коэффициенты считают постоянными в условиях аналогичных космических экспедиций. Значения коэффициентов для перевода основных бортовых ресурсов в приведенную массу для некоторых космических миссий приведены в табл. 3.1 (Maxwell, Drysdale, 2001). Коэффициент стоимости трудозатрат  $\gamma_{CT}$  не является постоянным. Он зависит от эквивалентной массы системы без учета трудозатрат экипажа,  $ESM_{NCT}$  и суммарного времени работы экипажа  $\sum t_{LSS, i}$  конкретной системы жизнеобеспечения. Это означает, что, прежде чем рассчитывать вклад, свя-

занный с трудозатратами экипажа, в полную эквивалентную массу, необходимо определить величины  $ESM_{NCT}$  и  $\sum t_{LSS, i}$ . Коэффициент  $\gamma_{CT}$  рассчитывается далее по формуле:

$$\gamma_{CT} = ESM_{NCT} / (t_{WORK} - t_{LSS}), \quad (3.7)$$

где  $t_{WORK}$  – полное рабочее время экипажа, которое разделяется на время  $t_{LSS} = \sum t_{LSS, i}$ , необходимое для обслуживания и ремонта системы жизнеобеспечения и оставшееся время ( $t_{WORK} - t_{LSS}$ ), используемое для выполнения полезной работы экспедиции.

Очевидно, что оценки бортовых ресурсов в терминах эквивалентной массы или эквивалентной стоимости для конкретной космической миссии желательно иметь уже на первом этапе проектирования, т. е. при формировании модели эффективности космической оранжереи для этого проекта. В то же время точность таких оценок и моделей эффективности не может быть велика вследствие неотработанности характеристик отдельных устройств и технологий, включенных в структуру биорегенеративных систем жизнеобеспечения космического корабля. На сегодняшний день наиболее достоверные экспериментальные данные, необходимые для оптимизации конструкции и режимов работы оранжерей, имеются только для сравнительно простых научно-исследовательских и салатных космических оранжерей применительно к МКС, да и то не в полном объеме.

Для более простой предварительной оценки технологической структуры при проектировании системы жизнеобеспечения в качестве глобального критерия был предложен минимум потребления бортовых ресурсов для производства единицы полезной продукции (Samsonov et al., 2000):

$$\phi = \frac{\text{общие затраты}}{\text{полезная продукция}}. \quad (3.8)$$

Для космической оранжереи такой критерий может быть выражен в виде минимума следующей линейной комбинации:

$$U_0 = \min \frac{1}{P} \frac{\sum_{i=1}^k \gamma_i R_i}{\sum_{i=1}^k \gamma_i}, \quad (3.9)$$

где  $P$  – производительность оранжереи по полезной биомассе за единицу времени;  $R_i$  – потребление оранжереей  $i$ -того ресурса за единицу времени;  $\gamma_i$  – обобщенная стоимость единицы  $i$ -того ресурса;  $k$  – количество видов потребляемых ресурсов.

При отсутствии удовлетворительных оценок  $\gamma_i$ , которые, как и при оценке эквивалентной массы, обычно зависят от длительности и характера космической экспедиции, состава экипажа, параметров всех подсистем космического корабля и других факторов, удобнее использовать более простой глобальный критерий оптимизации, предложенный для сравнения эффективности культивирования различных посевов растений при различных условиях среды (Berkovich et al., 2004):

(3.10)

$$Q = \max \frac{M_e \times K_n}{T \times V \times E},$$

где  $M_e$  – съедобная часть сухой биомассы посева;  $K_n$  – коэффициент хозяйственного использования, т. е. доля съедобной биомассы в общей биомассе посева;  $T$  – период времени между посевом и уборкой урожая;  $V$  – объем, занимаемый посевом;  $E$  – потребляемая посевом электроэнергия. Критерий обозначен буквой  $Q$  от английского слова «quality» – качество.

В числителе выражения (3.10) стоят основные показатели, увеличение которых повышает эффективность выращивания растений в космической оранжерее: прирост съедобной биомассы и коэффициент хозяйственного использования полученной биомассы, характеризующий степень безотходности производства. Наоборот, увеличение показателей, стоящих в знаменателе: период между получаемыми урожаями, объем, занимаемый установкой и ее энергопотребление – приводит к снижению эффективности работы оранжерей, т. е. уменьшению ее удельной производительности на затраченные ресурсы. Учитывая, что энергетические характеристики системы охлаждения для оранжерей, как правило, пропорциональны мощности, потребляемой оранжереей, а также то, что трудозатраты экипажа при длительной непрерывной работе салатной оранжереи приблизительно пропорциональны времени ее функционирования, можно считать, что  $Q$ -критерий отражает удельную производительность вегетационной установки, нормированную на все основные потребляемые бортовые ресурсы. Использование  $Q$ -критерия предполагает, что все перечисленные ресурсы имеют одинаковый порядок стоимости. В этом случае возможно предварительное сравнение эффективности космических оранжерей без сложных и неточных вычислений соотношений «цены» ресурсов для каждой конкретной космической экспедиции. Однако для корректного сравнения по  $Q$ -критерию различных технологий выращивания растений или различных конструкций оранжерей и их отдельных подсистем необходимо выполнение следующих условий:

- входные массопотоки, потребляемые ресурсы и полезный продукт в сравниваемых объектах должны быть сопоставимы; например, при сравнении производственных космических оранжерей входные массопотоки – это посадочный материал (семена, клубни и т. д.), а полезный продукт – съедобная растительная биомасса;
- качество получаемой продукции в сравниваемых объектах должно быть удовлетворительным для всех сравниваемых технологий и конструкций;
- сравниваемые объекты должны работать в близких по степени автономности космических экспедициях; в главе I мы уже приводили пример с устройством для выгонки растений, показывающий, что потребляемые ресурсы могут изменяться при увеличении срока автономной работы устройства.

Оценку эффективности отдельных подсистем космических оранжерей, имеющих одинаковое потребление какого-то ресурса или одинаковую характеристику урожая, можно проводить и

по более простому критерию, чем Q-критерий. Примером подобной процедуры может служить оптимизация параметров светового режима в оранжерее со стационарным конвейерным посевом, которая будет рассмотрена в разделе 3.2.2.

Формирование дискретного множества альтернативных вариантов структуры конкретной оранжереи с ограничениями на область допустимых значений параметров производится путем подбора ограниченного множества вариантов структуры посева и основных подсистем оранжереи, наиболее эффективных при сформулированных исходных данных. В настоящее время эта задача не может быть полностью формализована и решается на основе опыта разработчиков. Однако анализ эффективности вариантов и выработка рекомендаций по оптимизации структуры и проектных параметров оранжереи и ее подсистем с использованием Q-критерия, с учетом имеющейся информации об особенностях подсистем оранжереи и требований растений к среде обитания позволяют минимизировать роль субъективного фактора в процессе принятия проектных решений. Грамотный подход к проектированию производственных космических оранжерей требует обязательных количественных оценок эффективности альтернативных вариантов применительно к конкретной космической экспедиции. Например, в проектных организациях, разрабатывающих те или иные подсистемы жизнеобеспечения экипажей по заказу НАСА, раздел с расчетами эквивалентной массы разработанного изделия и его прототипов является обязательной частью документации проекта.

Таблица 3.1

Расчетные коэффициенты для перевода основных бортовых ресурсов в приведенную массу для различных космических экспедиции (Maxwell, Drysdale, 2001)

Вид экспедиции	Герметизированный объем, м <sup>3</sup> /кг	Электрическая мощность, кВт/кг	Мощность охлаждения, кВт/кг	Трудозатраты экипажа, чел-ч/кг
Околоземная орбитальная станция	0,015	0,0021	0,0061	-
Транзитная марсианская экспедиция	0,1934	0,012	0,0474	1
Марсианская экспедиция посещения	0,048	0,0115	0,015	2

Глобальный критерий эффективности различных конструкций космических оранжерей был применен нами при анализе работ (Левинских и др., 2001), (Berkovich et al., 2004a), авторы которых провели сравнительную оценку российской конвейерной оранжереи «Витацикл» и американской оранжереи «Salad Machine»; характеристики обеих оранжерей приведены в табл. 1.2. В первой из упомянутых работ подробно рассмотрены геометрические связи между объемами и площа-

дами в сравниваемых установках; однако авторы не указали, каким образом рассмотренные геометрические параметры связаны с продуктивностью посевов или с потребляемыми оранжереей ресурсами, поэтому сделанные заключения типа: «...площадь посевной поверхности сокращается в среднем в 3 раза, а объем зоны, в которой расположена основная масса листьев, сокращается в среднем в 2 раза, что создает неблагоприятные условия для растений...» — являются скорее интуитивными, нежели строго обоснованными. В данной работе был сделан вывод, что для производственной оранжереи «...предпочтительнее конструкция с плоской посевной поверхностью...», т. е. «Salad Machine». Однако расчет Q-критерия даже по упрощенной формуле:  $Q_1 = \max [M_E \cdot M_V]$ , где  $M_E$  и  $M_V$  – удельная суточная производительность оранжереи на единицу потребляемой энергии и объема, проделанный для обеих оранжерей (Berkovich et al., 2004a), выявил противоположную картину. Величины критерия  $Q_1$  составили  $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ г}^2 \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Дж}^{-1}$  для КОКОР «Витацикл» и  $5,1 \cdot 10^{-5} \text{ г}^2 \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Дж}^{-1}$  для «Salad Machine». Последующее компьютерное моделирование продукционного процесса растений в салатной оранжерее с цилиндрической вегетационной камерой, результаты которого приведены в главе 5, позволило удовлетворительно объяснить повышение фотосинтетической продуктивности посевов и удельной производительности оранжерей такого типа в расчете на затраченные ресурсы. Разработанные критерии эффективности позволяют в настоящее время объективно сопоставлять и оптимизировать конструкции космических оранжерей различного назначения.

### 3.1.2. Структура посева растений в космических оранжереях

Назначение оранжереи определяет выбор видовой и посадочной структуры посева растений, основные характеристики которых представлены на рис. 3.1. Выбор видовой структуры посева в биорегенеративных системах жизнеобеспечения в общем случае также представляет собой задачу многокритериальной оптимизации. Постановка этой задачи и методы ее решения подробно обсуждены в литературе и здесь рассматриваться не будут (Березовский и др., 1997; Drysdale, 2001; Hunter et al., 1998; Eisenberg et al., 1995). Отметим лишь, что видовая структура посева существенно влияет на конструкцию корневых модулей и посадочных устройств в космической оранжерее. Что касается посадочной структуры посева, то ее выбор подразумевает определение способов организации посева во времени и в пространстве.

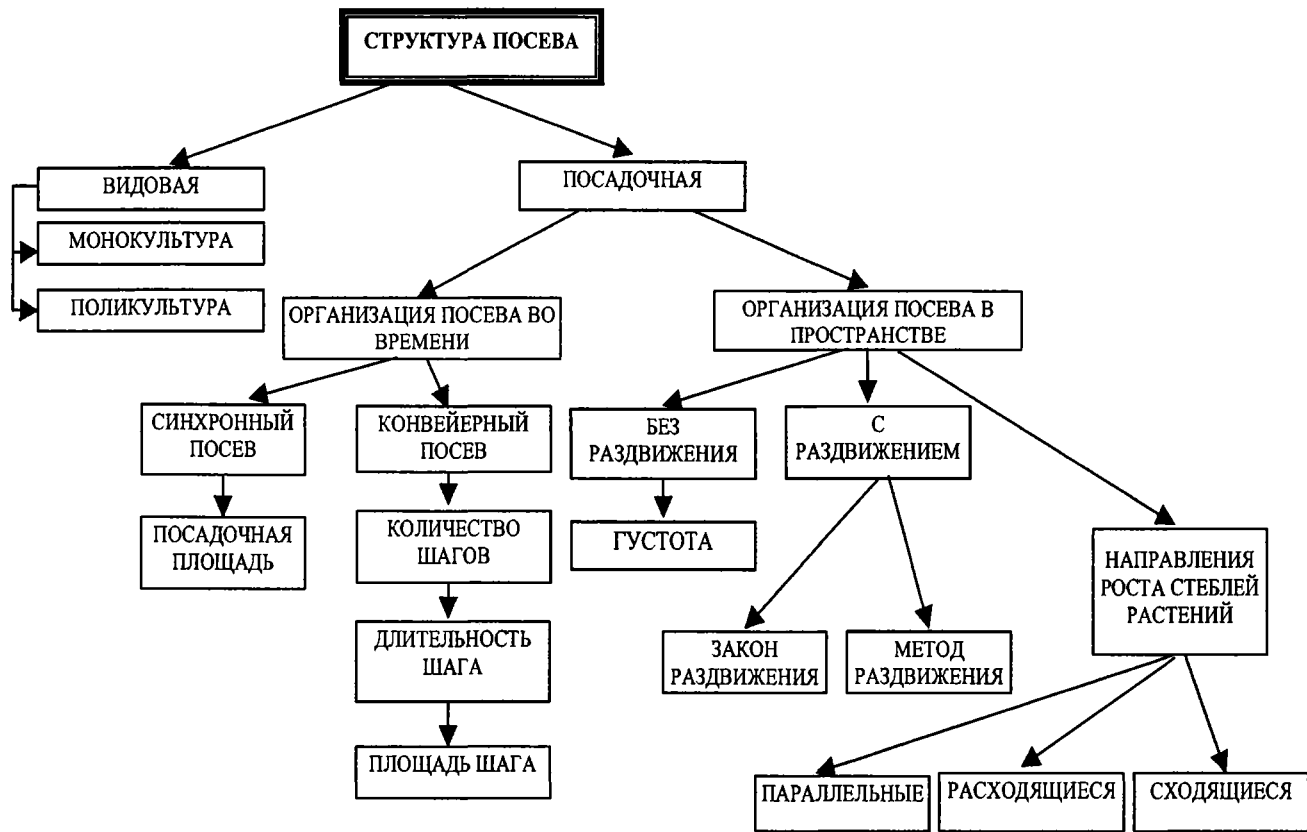


Рис. 3.1. Основные характеристики структуры посева в космических оранжереях

В синхронных, или одновозрастных, посевах неравномерность роста растений и интенсивности газообмена в процессе онтогенеза затрудняет стабилизацию параметров газовой среды и энергопотребления в космическом корабле. При такой технологии, кроме того, необходимы специальные средства для хранения растительной продукции в период между уборками урожая, а также неизбежно снижение пищевой ценности полученной биомассы в процессе ее хранения, например, уменьшение содержания витаминов в листьях зеленных культур (Гришин, 1993). Избегать указанных проблем возможно путем организации конвейерного посева, при котором посадочную поверхность разбивают на  $n$  равных или – в случае конвейера с раздвижением – неравных частей (Чучкин, 1967; Гительзон и др., 1975; Адамович и Горшенин, 1997). Число  $n$  называют количеством шагов конвейера. На  $i$ -той из этих частей ( $i = 1, 2, 3 \dots$ ), называемых шагами конвейера, выращивают растения в течение периода времени от  $iT/n$  до  $(i + 1) T/n$  (где  $T$  – длительность товарной вегетации посева). Отношение  $T/n$  называют длительностью шага конвейера, при этом каждому шагу конвейера соответствует определенная посадочная площадь и площадь светящей поверхности. Число  $n$  определяет периодичность получения порций урожая, а также амплитуду колебаний скорости газообмена всего конвейерного посева во времени (Гительзон и др., 1975). Очевидно, что конвейерная структура посева сама по себе никак не влияет на величину суммарного урожая посева, а лишь позволяет более равномерно распределить во времени его получение. Следует также отметить, что оптимальная длительность шага для различных культур может быть различна. В растительном конвейере, включающем несколько культур, подбор оптимальной длительности шага конвейера по  $Q$ -критерию целесообразно проводить с учетом норм потребления растительной продукции и допустимого срока ее хранения для каждой культуры, а также с учетом возможности организации благоприятного режима работы экипажа при обслуживании всего посева.

Одним из важнейших параметров, определяющих организацию структуры посева в пространстве, является листовой индекс,  $L$  – отношение суммарной площади листьев в посеве,  $S_l$ , к посадочной площади посева,  $S_p$ . Листовой индекс может быть выражен также через густоту посева, т. е. количество растений на единицу площади:

$$L = S_l^p \Gamma. \quad (3.11)$$

Здесь  $S_l^p$  – средняя площадь листьев одного растения;  $\Gamma$  – густота посева.

Рис. 3.2, взятый из работы (Сиротенко, 1981), иллюстрирует зависимость суммарного суточного фотосинтеза агроценоза от его листового индекса при естественном освещении с постоянной интенсивностью солнечной радиации. Величина  $L$  определяет закон светораспределения по глубине посева.



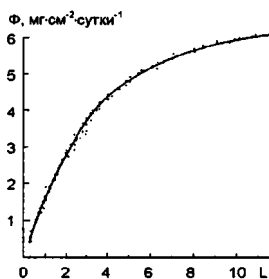


Рис. 3.2. Зависимость суммарного суточного фотосинтеза,  $\Phi$ , от его листового индекса,  $L$

Запишем выражение для фотосинтеза посева через листовой индекс и проанализируем эту зависимость. Приведем, например, уравнение скорости фотосинтеза для случая посева растений на единичной площади из работы (Charles-Edwards, 1981):

$$F_c = \frac{\alpha I_0 \tau_0 C_c [1 - \exp(-KL)]}{\alpha I_0 K + (1-k) \tau_0 C_c} - R_c. \quad (3.12)$$

Здесь  $F_c$  – скорость нетто-фотосинтеза сомкнутого посева растений на единицу площади;  $R_c$  – скорость темнового дыхания посева на единицу площади;  $\alpha$  – коэффициент утилизации света посевам;  $\tau_0$  – проводимость карбоксилирования верхних незатененных листьев;  $I_0$  – плотность вертикального светового потока, падающего на посев;  $C_c$  – концентрация углекислого газа в окружающем воздухе;  $k$  – коэффициент пропускания света листом;  $K$  – коэффициент экстинкции света в посевах.

Согласно уравнению из работы Сиротенко (1981) скорость темнового дыхания может быть выражена в виде:

$$R_c = r_0 M + r_1 F_c', \quad (3.13)$$

где  $M$  – сухая биомасса посева на единичной площади;  $r_0$  – коэффициент дыхания поддержания;  $r_1$  – коэффициент дыхания роста.

Если примем приближенное условие:  $M = mL$ , где  $m$  – сухая масса листа единичной площади, то уравнение (3.12) можно преобразовать к виду:

$$F_c = \frac{\alpha C_c I_0 \tau_0 [1 - \exp(-KL)]}{\alpha I_0 K + (1-k) \tau_0 C_c (1+r_1)} - \frac{r_0 mL}{1+r_1}. \quad (3.14)$$

Анализ выражения (3.14) показывает, что функция  $F_c(L)$  имеет максимум в некоторой точке  $L_0$ :

$$L_0 = \frac{1}{K} \ln \left\{ \frac{\alpha C_c K I_0 \tau_0}{r_0 m [\alpha K I_0 + (1-k) C_c \tau_0]} \right\}. \quad (3.15)$$

Следовательно, подобрав густоту посева таким образом, чтобы выполнялось условие  $L = L_0$ , можно получить структуру посева с максимальной для заданного уровня освещения скоростью фотосинтеза, а следовательно, и продуктивностью этого посева. Впервые эту возможность повышения производительности в космических оранжереях отметил, по-видимому, В. Г. Чучкин в работе (Чучкин, 1967). Поскольку суммарная площадь листьев в растущем посеве в вегетативной фазе обычно существенно увеличивается с возрастом растений, как правило, условие  $L = L_0$  будет выполняться для одних и тех же растений разного возраста при различной густоте посева. Отсюда возникла идея организации посева с раздвижением растений по мере их роста. Простейшим примером такой технологии является выращивание овощных культур из рассады, когда рассаду выращивают при большой густоте посадки, а затем пикируют (прореживают). В работе (Адамович и Горшенин, 1997) показано, что для сохранения в процессе онтогенеза растений постоянного значения листового индекса посадочная площадь  $S_n$  должна увеличиваться по экспоненте вида:

$$S_n = \frac{S_n^0}{L_0} \exp\left(\frac{\delta m_n \sigma}{L_0} t\right), \quad (3.16)$$

где  $S_n^0$  – начальная посадочная площадь;  $\delta m_n$  – приращение листовой поверхности за время  $t$ ;  $\sigma$  – масса листа единичной площади.

Следует отметить, что часть параметров в правой части уравнения (3.14) может изменяться с возрастом растений, поэтому  $L_0$  является некоторой функцией времени. Однако на практике для расчета закона раздвижения посевов используют более простое выражение (3.16).

Для реализации раздвижения растений в посевах был предложен ряд оригинальных устройств: в виде спирально-лучевого механизма – соосных горизонтальных дисков со спиральными и радиальными прорезями (Чучкин, 1967; Мельников и Посадский, 1974; Бегров, 1975), в виде винтов переменного шага (Адамович и Горшенин, 1997; Дарис, 1980), а также в виде систем транспортеров и кулисных механизмов (Адамович и Горшенин, 1997). Мы разработали новый метод раздвижения растений в посевах на криволинейных посадочных поверхностях, для которого не требуется никаких дополнительных механизмов (Беркович и др., 1979а; Беркович и др., 1979б; Беркович и др., 1982а; Беркович и др., 1982б; Беркович и др., 1992; Беркович, Павловский, 1997). При предложенной организации посева происходит самораздвижение растений за счет их специального пространственного расположения, т. е. в посевах увеличиваются расстояния между верхушками стеблей растений по мере их роста. Подробнее этот метод и соответствующие устройства будут описаны в главе 5.

### 3.2. Классификация основных подсистем конструкции космических оранжерей и их характеристики

Основным назначением конструкции любой космической оранжереи является жизнеобеспечение посева растений, поэтому эти устройства должны содержать системы, обеспечивающие

адекватную среду обитания для выполнения основных жизненных функций высших растений, а также управление оранжерей:

1. вегетационную систему;
2. систему освещения;
3. систему корневого снабжения;
4. систему регулирования состава газовой среды;
5. систему термовлагорегулирования;
6. систему контроля и управления.

### 3.2.1. Вегетационная система

Под вегетационной системой мы понимаем комплекс устройств, обеспечивающих определенное взаимное расположение растений и элементов конструкции оранжереи в течение вегетации, а также проведение посадки, уборки и других агротехнических операций. К вегетационной системе оранжереи можно отнести вегетационную камеру, в которой размещены вегетационные сосуды, или корневые модули (КМ), с растениями, посадочные устройства и другие приспособления для проведения агротехнических операций. На рис. 3.3 приведены основные характеристики вегетационных систем космических оранжерей.

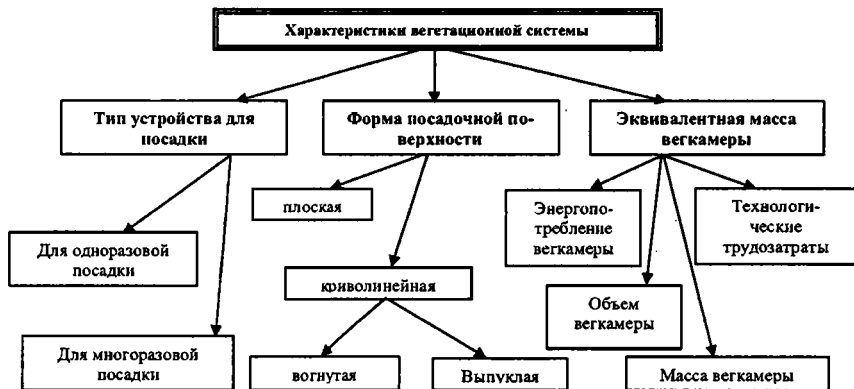


Рис. 3.3. Основные характеристики вегетационной системы космических оранжерей

Тип устройства для посадки определяется в первую очередь количеством планируемых вегетаций в КМ и, соответственно, потребностью проведения посадки растений и замены субстрата в КМ в условиях космического полета. При одноразовой вегетации в исследовательских оранжереях на космический корабль обычно поставляли вегсосуды с уже заделанными семенами (в КО «Вазон», «Лютик», «Светоблю», «Оазис-3», РГУ и др.). В случае длительного автономного использования космической оранжереи на борт необходимо поставлять запасные корневые модули

или субстратные вкладыши с заделанными в них семенами или семена, закрепленные в специальных посадочных устройствах, поскольку традиционный посев сухих мелких семян в условиях микрогравитации весьма трудоемок. В настоящее время разработаны 2 типа устройств, опробованных для посадки семян в условиях космического полета: так называемая «пневматическая пушка» в виде трубки с выдуваемыми или выдавливаемыми из нее в посадочное место семенами (в КО «Фитон» и «Оазис-1М»), а также разработанные нами посадочные планки с наклеенными на боковой поверхности семенами, которые будут описаны в главе 4.

Важной характеристикой оранжереи является форма посадочной поверхности в вегетационной камере. В настоящее время известны оранжереи с плоской посадочной поверхностью (во всех исследовательских космических оранжереях), с вогнутой цилиндрической посадочной поверхностью (Brody, 1980), а также с выпуклой цилиндрической посадочной поверхностью (в оранжереях «Фитоцикл», «Витацикл», «Фитоконвейер»). Форма посадочной поверхности определяет пространственную структуру посева и светораспределение в нем. В главе 5 будет показана связь этих характеристик с объемом вегетационной камеры и энергопотреблением оранжереи, определяющими эквивалентную массу конструкции.

### **3.2.2. Система освещения**

Выше уже указывалось, что система освещения является основным потребителем энергии в космической оранжерее. Основные характеристики системы освещения растений в космических оранжереях даны на рис. 3.4.



Рис. 3.4. Основные характеристики системы освещения космических оранжерей

### 3.2.2.1. Характеристики источников света для освещения растений

Одной из важных характеристик космической оранжереи является тип используемых в ней источников света: солнечное излучение, искусственные источники или их комбинация. Различные источники света обладают различными спектрами излучения в области фотосинтетически активной радиации (ФАР), которую в разных источниках определяют как диапазон длин волн либо от 400 до 750 нм (Клешнин, 1954), либо от 350 до 850 нм (Sager, Mc Farlane, 1997). Оптическое облучение посевов на разных участках ФАР по-разному воздействуют на фотосинтез и морфогенез облучаемых растений. На рис. 3.5 в относительных единицах представлены спектральные характеристики активности фотобиологических процессов растений, взятые из работы (Рождественский, Клешнин, 1980), а на рис. 3.6 – зависимость фотосинтетического квантового выхода, отражающего суммарную активность ряда пигментов листа, а также поглощения света и скорости фотосинтеза хлоропластов от длины волны света, приведенная в работе (Geiger, 1994).



Рис. 3.5. Спектральные характеристики активности фотобиологических процессов растений. 1 – фотосинтез; 2 – фотоморфогенез; 3 – фотоперидизм; 4 – синтез хлорофилла



Рис. 3.6. Зависимость фотосинтетического квантового выхода в молях фиксированного углерода на моль поглощенных фотонов (1), поглощения света (2) и скорости выделения кислорода (3) хлопчатником от длины световой волны в относительных единицах

Напомним, что квантовый выход равен отношению количества ассимилированного листом углекислого газа к количеству поглощенных листом фотонов. Можно отметить, что все фотобиологические процессы при естественном свете наиболее активны в диапазоне длин волн от 650 до 735 нм (красно-оранжевая и дальняя красная части спектра) и имеют еще один меньший по амплитуде максимум в синей части спектра (430–480 нм), однако суммарный квантовый выход относительно мало изменяется в пределах диапазона длин волн от 400 до 680 нм. Отметим также, что важные для пространственной ориентации в условиях микрогравитации фототропические реакции имеют максимум активности в сине-фиолетовой части светового спектра (400–500 нм), что отражено на рис. 3.7 из работы (Hashimoto, 1994).

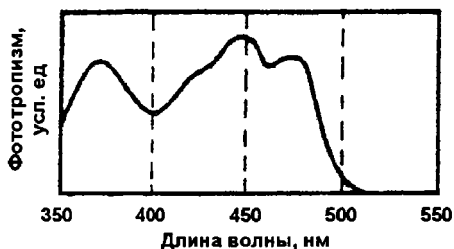


Рис. 3.7. Зависимость фототропизма колеоптиля *Avena sativa* от длины световой волны в сине-фиолетовой части спектра

Пример спектрального распределения солнечного излучения в околоземном пространстве вне ее атмосферы, приведенный в работе (Nakamura et al., 1999), дан на рис. 3.8. Плотность потока энергии солнечного излучения у Земли составляет около  $1,35 \text{ кВт/м}^2$ , а вблизи Марса – около  $0,55 \text{ кВт/м}^2$ , из которых в области ФАР содержится около 38 %.

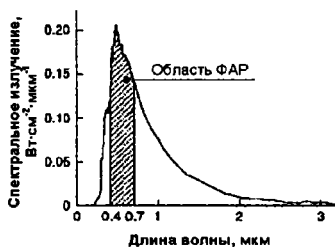


Рис. 3.8. Спектральное распределение солнечной радиации

Существуют 3 способа использования этой энергии для освещения растений в космических летательных аппаратах: преобразование ее в электрическую с последующим использованием искусственных источников света, непосредственное заведение солнечного света в вегетационную камеру с растениями и смешанный – с использованием части солнечного излучения, в том числе и вне диапазона ФАР, для производства электроэнергии, подаваемой к электролампам дополнительной или аварийной подсветки (Cuello et al., 1999). Предварительные расчеты показали, что непосредственное использование солнечного света будет необходимым условием культивирования растений на лунной и марсианской базах, поскольку позволяет снизить приведенную массу БТСЖО и сделать ее более конкурентоспособной по сравнению с ФХСЖО (Drysdale et al., 1999). Основным преимуществом такого способа освещения является снижение энергетических потерь:

эффективность использования в них энергии солнечного света может составлять до 66 % (уже достигнута величина 30 %), в то время как суммарный КПД систем освещения на электрических лампах в космических оранжереях не превышает 3 % (Drysdale et al., 1999). Прогресс в совершенствовании оптических кабелей за последние годы позволил довести их энергетический КПД до 47 % (Cuello et al., 1998). Система заведения солнечного света обычно включает:

- концентратор света;
- систему ориентации концентратора или входного иллюминатора;
- систему световодов;
- систему охлаждения системы освещения.

Поскольку в космических оранжереях с непосредственным использованием солнечного света отсутствует возможность выбора длительности периодов естественного освещения и темноты, для большинства космических экспедиций потребуется дополнительная резервная система освещения на электрических источниках света. Необходимо принимать во внимание изменение спектральной характеристики солнечного света после прохождения через систему концентрирования и светоразведения на основе оптоволоконных кабелей и/или труб, а также проблемы с теплоотводом от световодов в условиях микрогравитации. В целом, система освещения с непосредственным использованием солнечного света до настоящего времени оказывалась слишком сложной и дорогой для исследовательских космических оранжерей, и в настоящее время нет ни одной действующей бортовой оранжереи такого типа. Эти же причины будут препятствовать применению солнечных концентраторов и световодов в небольших витаминных оранжереях ближайшего будущего. Однако естественное освещение, без сомнения, должно использоваться в оранжереях на поверхности колонизируемых планет.

Искусственные источники света, применяемые в космических оранжереях, можно подразделить на 2 класса: электролампы и светонзлучающие диоды – полупроводниковые приборы, генерирующие оптическое излучение при прохождении через них электрического тока (Варфоломеев, 1998). На рис. 3.9, взятом из работы (Bugbee, 1994), представлены спектры излучения некоторых электрических источников света.



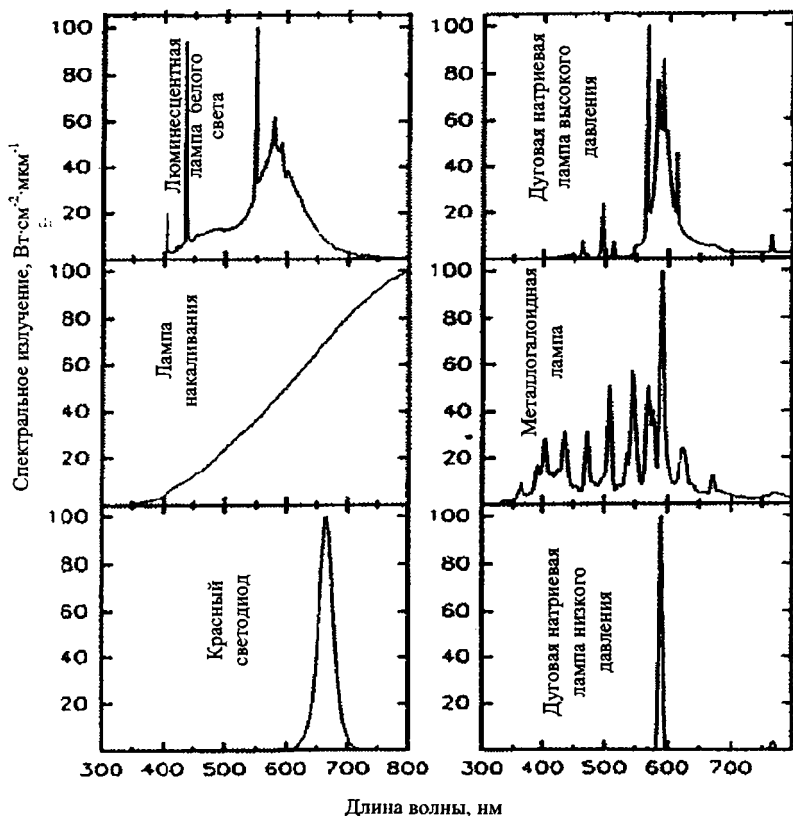


Рис. 3.9. Спектры излучения электрических источников света в области ФАР

Среди электроламп для космических оранжерей используют чаще всего газоразрядные, поскольку лампы накаливания имеют крайне низкий КПД преобразования электроэнергии, низкую светоотдачу в области ФАР и относительно высокую в области инфракрасной радиации (соотношение по мощности ФАР/ИКР не превышает 0,12). Это приводит к необходимости фильтрации инфракрасной радиации во избежание перегрева листьев растений, освещаемых лампами накаливания. Для светильников космических оранжерей считаются перспективными, следующие электрические источники света (Cuello et al., 1999):

- дуговые лампы (натриевые лампы высокого и низкого давления, ксеноновые лампы высокого давления);
- дуговые металлогалогенные лампы с парами редкоземельных металлов;
- флуоресцентные лампы (ртутные низкого давления, холодного и теплого белого света);
- безкатодные микроволновые лампы (например, с наполнителем из паров серы);
- светодиоды.

Обсуждению достоинств и недостатков упомянутых электрических световых источников для выращивания светокультуры растений посвящено большое количество работ (Клешнин, 1954; Рождественский, Клешнин, 1980; Cuello et al., 1999; Bugbee, 1994; McLennan et al., 1994; Bula et al., 1994; Prikupets, Tikhomirov, 1994; Sager, McFarlane, 1997). Приведем лишь сводные табл. 3.2 и 3.3 из работ (Cuello et al., 1999; Tennessen, Ciolkosz, 1998), характеризующие энергетическую и фотосинтетическую спектральную эффективность, а также тепловыделение различных источников света. Под энергетическим КПД лампы,  $E_z$ , понимают здесь отношение суммарной мощности ФАР, излучаемой лампой (в Вт), к мощности потребляемой ею электроэнергии (в Вт).

В последнее время для характеристики ФАР, излучаемой источниками света, обычно используют величину плотности потока фотонов, измеряемую в квантовых единицах ( $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ), а не плотность потока световой энергии, измеряемую в ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ), так как, согласно закону Гротгуса, число падающих на лист квантов света может обеспечить синтез строго определенного количества сахаров. Таким образом, максимально возможное количество фотоассимилятов, синтезированных листом, зависит от количества падающих на лист квантов света, а не от их суммарной энергии (Тихомиров и др., 2000; Thimijan, Heins, 1983). В моделях продуктивности посевов можно считать, что скорость фотосинтеза пропорциональна числу поглощенных световых квантов. Отсюда следует, что при одинаковой облученности растений те источники света, которые имеют максимум излучения в красной области, должны быть более эффективны, поскольку количество фотонов в световом потоке в этом случае максимально. В табл. 3.2 приведены соотношения между различными единицами измерения плотности светового потока в области ФАР от различных источников, взятые из литературы.

Таблица 3.2

Переводные коэффициенты для единиц измерения излучения различных источников света

Источник излучения	мкмоль·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	Вт/м <sup>2</sup>	мкмоль·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	Люксы	Вт/м <sup>2</sup>	Люксы
	в Вт/м <sup>2</sup>	в мкмоль·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	в Люксы	в мкмоль·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	в Люксы	в Вт/м <sup>2</sup>
Солнечный свет	0,219	4,57	54	0,019	0,249	4,02
Люминесцентная лампа белого света	0,218	4,59	74	0,014	0,341	2,93
Дуговая натриевая лампа высокого давления	0,201	4,98	82	0,012	0,408	2,45
Металлогалогидная лампа высокого давления	0,218	4,59	71	0,014	0,328	3,05
Натриевая лампа низкого давления	0,203	4,92	106	0,009	0,521	1,92
Галогенная лампа накаливания	0,200	5,00	50	0,020	0,251	3,99

Для перехода от одних единиц к другим нужно умножить величину светового потока на множитель, приведенный в таблице.

Для перехода от Люксов к Кандедам нужно умножить величину светового потока на множитель 93,02.

Фотосинтетическую спектральную эффективность,  $E_c$ , определяют как отношение выхода фотосинтетического квантового потока от лампы, вычисляемого по всему спектру излучения лампы с учетом спектра фотосинтетической эффективности световых волн (в Вт), к суммарной мощности ФАР, излучаемой лампой (в Вт) (Тихомиров и др., 2000):

$$E_c = \frac{1}{P_1} \int_{400\text{ нм}}^{750\text{ нм}} V_\lambda P_\lambda d\lambda \quad (3.17)$$

Здесь  $P_1$  – мощность ФАР, излучаемой лампой;  $V_\lambda$  – фотосинтетическая эффективность световой волны с длиной  $\lambda$  (см. рис. 3.6);  $P_\lambda$  – мощность излучения лампы на длине волны  $\lambda$ .

Чем больше величина  $E_c$ , тем большая доля энергии излучения лампы сконцентрирована в областях, близких к максимуму на кривой зависимости фотосинтетического квантового выхода от длины волны света (610–680 нм). Отметим, что по совокупности энергетических характеристик перспективным типом электрического источника света для будущих производственных космических оранжерей являются дуговые натриевые лампы высокого давления (Sager, Mc Farlane, 1997;

Рождественский и Клешнин, 1980; McLennan et al., 1994; Гришин и др., 1999; Mashinsky et al., 1994). В настоящее время они используются почти во всех производственных оранжереях для наземных моделей БТСЖО.

Таблица 3.3

Энергетический КПД и спектральная эффективность и тепловой выход различных электрических источников света

Тип лампы	Мощность, Вт	E <sub>з</sub>	E <sub>с</sub>	Суммарные теплотери, %
Флуоресцентная белого света	225	0,131	0,667	43
Натриевая низкого давления	230	0,227	0,825	48
Натриевая высокого давления	470	0,204	0,761	28
Металлогалоидная	460	0,184	0,554	26
Микроволновая	1000	0,199	0,635	54
Красный светодиод (660 нм)		0,157	0,949	
Синий светодиод (450 нм)		0,016	0,529	

Наибольшей спектральной эффективностью обладают натриевые лампы низкого давления и красные светодиоды, обладающие очень узким спектром излучения в желтой и красной областях, соответственно (рис. 3.9). Однако такое излучение не всегда обеспечивает адекватный фотоморфогенез растений (Тихомиров и др., 2000; Тихомиров, 2002). Если посевы пшеницы могут нормально расти и развиваться под почти монохроматическим освещением от красных светодиодов (Bugbee, 1994; Douger, Bugbee, 1999), то растения сои и арабидопсиса обнаруживают существенные отклонения в развитии (вытянутый гипокотиль, узкие семядоли, удлиненные межузлия, пониженное содержание хлорофилла, запаздывание цветения, пониженный выход семян) (Sager, McFarlane, 1997; Douger, Bugbee, 1999; Douger и Bugbee, 1998; Goins et al., 1998). Отклонения устраняются, как правило, путем добавления к свету красных светодиодов до 10 % (по мощности) синего излучения (Yorio et al., 1998). Для некоторых растений небольшие изменения в спектре света вызывают существенные отклонения в составе их биомассы. В работе (Johnson et al., 1999) было, например, обнаружено, что добавление к свету флуоресцентных ламп дальнего красного излучения (от светодиодов с длиной волны 735 нм) на порядок увеличило содержание нитратов в листьях шпината. Эти данные показывают, что при подборе электрических источников света для космической оранжереи помимо энергетических характеристик – E<sub>з</sub>, E<sub>с</sub> и теплового выхода желательно проверять также специфическое влияние излучаемого светильником светового спектра на

морфогенез используемых видов. В работе (Sager et al., 1988) было предложено в качестве количественной оценки фотоморфогенетического эффекта от источника света использовать соотношение различных форм фитохрома в листьях полученных растений. Например, рекомендовано использовать отношение содержания активной формы фитохрома, использующей дальний красный свет, к общему содержанию фитохрома. Понижение этого соотношения обычно свидетельствует о неблагоприятном с точки зрения фотоморфогенеза спектре источника света. Для коррекции спектра излучения иногда рекомендуют использовать различные светофильтры (Рождественский и Клешина, 1980), однако их применение снижает энергетический КПД источника и вызывает дополнительные трудозатраты на их очистку и замену.

При оценке энергетических характеристик разных типов источников света надо также принимать во внимание, что спектральные характеристики активности фотобиологических процессов растений, изображенные на рис. 3.5, могут изменяться в процессе адаптации растений к длительному освещению конкретным искусственным источником света (Тikhomirov, 1994). Отсюда следует, что не всегда корректно использовать одну и ту же зависимость фотосинтетического квантового выхода от длины волны света (рис. 3.6) для получения оценок  $E_c$ .

В заключение добавим, что при проектировании светильников для космической оранжереи большую роль играют такие характеристики источника света, как размер светящегося тела, единичная мощность, срок службы, трудозатраты на обслуживание, а также их гигиеничность и безопасность в нестандартных ситуациях. Например, люминесцентные лампы, в которых используется газовый разряд в парах ртути, потенциально небезопасны, поскольку в случае утечки могут выбросить в газовую среду космического корабля высокотоксичные пары ртути. В настоящее время для таких ламп используют светильники с 2–3 параллельными конструктивными средствами защиты от утечек, что увеличивает эквивалентную массу системы освещения космических оранжерей.

Альтернативой газоразрядным лампам являются интенсивно разрабатывающиеся в настоящее время мощные светоизлучающие диоды. Эти электротехнические приборы имеют целый ряд преимуществ перед электрическими лампами в светокультуре растений: высокую интенсивность потока излучаемых фотонов (до  $1000 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ); высокую световую отдачу (свыше  $30 \text{ лм/Вт}$ ); отсутствие инфракрасной радиации в спектре излучения; весьма длительный срок службы (до  $100000 \text{ ч}$ ); отсутствие в схеме включения горячих электродов и высоковольтных балластов; безопасность в использовании. Исследования влияния спектрального состава излучения на развитие и состав биомассы зеленных культур (Goins, 2002; Hoenecke et al., 1992) показали, что в спектре излучения, кроме основной красно-оранжевой составляющей (с длиной волны  $630\text{--}700 \text{ нм}$ ), необходимо присутствие синей компоненты (с длиной волны  $450\text{--}490 \text{ нм}$ ) в количестве примерно  $10\%$  от суммарной плотности светового потока. В опытах с растениями салата и шпината, выра-

ценными под светодиодными светильниками, обеспечивающими излучение в красной и синей областях спектра, продуктивность этих культур практически не снижалась по сравнению с растениями под люминесцентными или натриевыми лампами (Goins, Yorio, 2000; Goins et al., 2001). Аналогичные результаты были получены в опытах с различными видами листовой капусты (пекинская капуста, сорт Хибинская, китайская капуста, сорта Ласточка и Веснянка) в конвейерной оранжерее «Фитоцикл СД». Преимущества светодиодов позволяют считать их в настоящее время одними из наиболее перспективных источников света для проектируемых космических оранжерей (Опо et al., 1998). Светодиодными светильниками снабжены такие космические оранжереи, как ADVANCED ASTROCULTURE, CPBF и PRU (американские исследовательские космические оранжереи), а также «Фитоцикл СД» и «Фитоконвейер» (русские опытные образцы салатных оранжерей). На рис. 3.10 показан внешний вид осветительного элемента светильника оранжереи «Фитоцикл СД» с красными и синими светоизлучающими диодами.

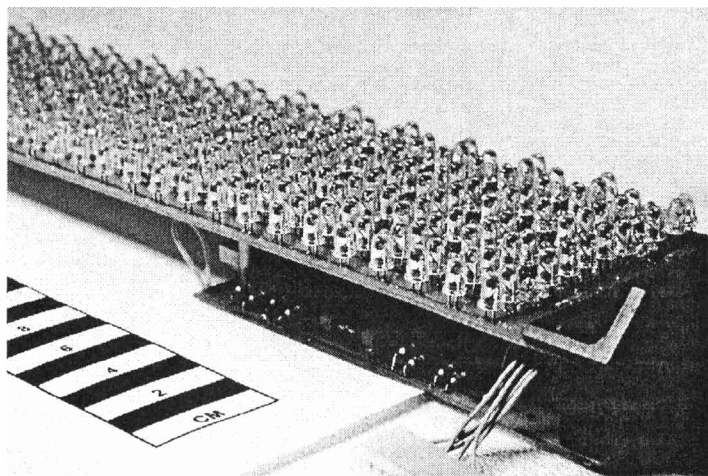


Рис. 3.10. Панель со светодиодами светильника оранжереи «Фитоцикл СД»

В светильнике оранжереи ADVANCED ASTROCULTURE, кроме красных и синих светодиодов, установлено небольшое количество (около 10 %) зеленых с длиной волны излучения около 525 нм. Эти светодиоды дают возможность визуально воспринимать окраску листьев как естественную, поскольку под красно-синим светом листья выглядят как черно-бордовые. С этой же целью в «Фитоцикле СД» над смотровым люком установлено несколько рядов белых светодиодов.

## 3.2.2.2. Оптимизация светового режима в космических оранжереях

Помимо выбора типа источника света одной из задач проектирования системы освещения для космических оранжерей является оптимальное размещение этих источников по отношению к посеву растений. Традиционно в известных исследовательских космических оранжереях источники света располагали вне посева растений. Чаще всего световые источники размещали над посевом, во-первых, чтобы избежать контакта органов растений с нагретыми колбами ламп, а во-вторых, чтобы облегчить технологические операции с растениями в вегетационных камерах малого размера. Однако по мере увеличения объема оранжереи и при использовании высокорослых и шпалерных культур (соевые бобы, томаты, огурцы) все большее внимание привлекают компоновки с расположением источников света внутри посева. Светотехнические измерения в посевах пшеницы в фитотронах и на небольших (порядка  $1 \text{ м}^2$ ) участках в теплицах показали, что энергия бокового освещения для этого случая может составлять до 50 % от общего светового потока (Bugbee, 1994). Идея использования бокового освещения, наряду с верхним, была реализована, например, в 70-е годы в промышленной теплице с вертикальным перемещением растительного конвейера конструкции О. Рутнера (фирма «Фогельбуш») (Адамович и Горшенин, 1997). В работах (Stasiak et al., 1998; Frantz et al., 1998) предложены различные конфигурации как бокового, так и объемного размещения электрических источников света в посевах растений. В качестве источников света внутри посева удобно размещать световоды, например, в виде световых труб или светящейся пленки (Stasiak et al., 1999). В фитотроне объемом  $29 \text{ м}^3$  с размещенной в междурядьях соевых бобов вертикально расположенной светящейся пленкой обеспечивалась боковая подсветка потоком ФАР порядка  $150 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2\text{с})$  на расстоянии 100 мм. Кроме того, использовали верхние и боковые источники света в виде микроволновых ламп. Было обнаружено, что увеличение потребляемой мощности за счет введения источников света внутрь посева на 59 % привело к повышению выделения посевом  $\text{O}_2$  вдвое, а эвапотранспирации – на 160 %, однако ассимиляция  $\text{CO}_2$  при этом возросла лишь на 33 %. Этот пример показывает, что системы с источниками света внутри посева могут быть эффективны лишь при тщательной оптимизации конструкции и световых режимов. Авторы работы (Frantz et al., 1998) на основании опытов с различными способами размещения флуоресцентных ламп внутри посева вигны пришли к выводу, что оптимизация размещения ламп с точки зрения постепенного увеличения облученности нижних листьев растений по мере их роста при специально подобранной плотности посева может обеспечить повышение урожая этой культуры на 50 % при увеличении энергопотребления светильников лишь на 10 %. Среди важнейших характеристик качества освещения растений, помимо спектрального распределения энергии, считают следующие (Geiger, 1994):

- интенсивность, или плотность потока ФАР (облученность растений,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), или квантового потока ФАР (в  $\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ );

- фотопериод, или соотношение длительности периодов освещения растений и темноты;
- длительность освещения в течение вегетации.

### 3.2.2.3. Зависимость удельной производительности космической оранжереи от параметров светового режима

Одной из главных характеристик производительности оранжереи считают продуктивность,  $P$ , посева растений, которая равна приросту биомассы растений за сутки с единицы освещаемой площади посева. Габаритно-объемные характеристики известных промышленных вегетационных установок с искусственным климатом, приведенные, например, в работах (Рождественский и Клешнин, 1980; Барышнев и др., 1976), показывают, что для близких по размерам видов растений и при одинаковом методе корневого питания объем вегетационной камеры оранжереи в первом приближении пропорционален ее посадочной площади (отношение площади к объему для большинства описанных вегетационных камер находится в диапазоне  $0,45 \pm 0,03$ ). Отсюда следует (Беркович, 2000), что продуктивность посева растений в оранжерее можно приближенно считать пропорциональной другой важной удельной характеристике космической оранжереи – суточной производительности оранжереи на единицу ее объема,  $M_V$ :

$$M_V = \gamma P, \quad (3.18)$$

где  $\gamma = s/V$ ;  $s$  – освещаемая площадь посева в оранжерее;  $V$  – объем оранжереи. Отметим здесь, что величина  $\gamma$  является одной из важнейших конструктивных характеристик космической оранжереи.

Еще одной удельной характеристикой является производительность оранжереи, приходящаяся на единицу затраченной на освещение посева энергии,  $W$ , или энергетическая эффективность оранжереи  $M_E$ . Можно записать:

$$M_E = s P/W, \quad (3.19)$$

где  $W$  – энергия, потребляемая блоком освещения оранжереи за сутки;  $s$  – освещаемая площадь посева в оранжерее. Для многих типов осветительных устройств в широком диапазоне значений плотности светового потока выполняется соотношение:

$$W = s \delta \int_0^{\tau} I(t) dt, \quad (3.20)$$

где  $t$  – время;  $I(t)$  – функция плотности потока фотосинтетически активной радиации (ФАР) на выходе светильника, или функция облученности верхних листьев в посевах, от времени;  $\tau$  – длительность фотопериода;  $\delta$  – коэффициент, зависящий от типа ламп, конструкции отражателя и компоновки вегетационной камеры. В рамках данной работы будем сумму фотопериода,  $\tau$ , и темного периода,  $d$ , считать равной земным суткам, т. е., в часах,  $(\tau + d) = 24$ , хотя в общем случае согласно схеме на рис. 3.4 значение этой суммы также является одной из выбираемых характери-



стик системы освещения оранжереи и подлежит оптимизации. В современных космических оранжереях интенсивность света в течение фотопериода не изменяют, т. е.  $I(t) = I = \text{const}$  и, соответственно, выражение (3.20) принимает вид:

$$W = s \delta I \tau. \quad (3.21)$$

Подставив выражение (4.4) в (4.2) и с учетом (4.1), получаем:

$$M_E = Mv/(\gamma \delta I \tau), \quad (3.22)$$

где  $\gamma$  и  $\delta$  – константы.

Рассмотрим зависимость продуктивности посева растений от параметров режима освещения, используя математические модели фотосинтеза и продуктивности для сомкнутого посева растений, согласно, например, работе (Charles-Edwards, 1981). Для такого посева на единичной площади можно записать:

$$P = \int_0^{\tau} f dt - \int_0^{\tau} R_c dt, \quad (3.23)$$

где  $f$  и  $R_c$  – скорости нетто-фотосинтеза и темнового дыхания посева соответственно.

Первый интеграл в выражении (3.23) можно выразить через уравнение «световой кривой фотосинтеза» посева, которое, согласно упомянутой работе (Charles-Edwards, 1981), может быть приближенно представлено в виде:

$$f = \frac{\lambda I[1 - \exp(-KL)]}{\alpha_1 I + \beta}, \quad (3.24)$$

где  $I$  – плотность вертикального потока ФАР на уровне верхних, незатененных листьев растений в посеве; обычно она практически равна плотности потока ФАР на выходе светильника;  $L$  – листовой индекс посева;  $K$  – коэффициент рассеивания (экстинкции) света в посеве, зависящий в основном от строения и расположения листьев растений в посеве;  $\lambda$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta$  – коэффициенты, зависящие от особенностей фотосинтетического аппарата растений и ряда параметров среды обитания, за исключением освещения; расшифровку физического смысла коэффициентов можно получить, сопоставив уравнения (3.24) и (3.12).

Второй интеграл в выражении (3.23) для высокоинтенсивных посевов зеленных культур слабо зависит от плотности потока ФАР и его максимальное значение в течение светопериода, например, для посевов салата по данным работ (Wheeler et al., 1996; Wheeler et al., 1994) и посевов листовой горчицы и пекинской капусты по нашим данным не превышает 15–17 % от величины дневного фотосинтеза. С учетом того, что фотопериод в космических оранжереях обычно составляет не менее 14–16 ч, значения второго интеграла в уравнении (3.23) в нашем случае оказываются многократно меньше первого, и в приближенном рассмотрении мы можем им пренебречь. При стационарном режиме освещения, постоянных параметрах среды обитания и квазистационарной

структуре посева растений в оранжерее скорость фотосинтеза будет близка к постоянной, и с учетом выражения (3.24) можно приблизительно переписать выражение (3.18) в виде:

$$M_v = \frac{\gamma \lambda \tau I [1 - \exp(-KL)]}{\alpha I + \beta} \quad (3.25)$$

Как видно из уравнения (3.25), удельная продуктивность посевов  $M_v$  в оранжерее монотонно возрастает с увеличением плотности потока ФАР, асимптотически приближаясь к максимальному значению, соответствующему «световому насыщению» фотосинтеза посева растений. Практически можно считать, что при возрастании светового потока максимальное значение продуктивности посева растений достигается при наименьшем из значений, для которого выполняется условие:

$$\lim_{I \rightarrow \infty} P(I) - P(I_p) \leq \Delta \text{ при } I = I_p,$$

где  $\Delta$  – доверительный интервал экспериментальной статистической оценки продуктивности при выбранном уровне значимости.

Для анализа зависимости энергетической эффективности оранжереи от плотности потока ФАР, падающего на посев растений, найдем выражение для величины  $M_E$  через удельную производительность  $M_v$  с учетом темнового дыхания растений. Согласно работе (Charles-Edwards, 1981) (см. также уравнения (3.12) и (3.13)), суточный прирост биомассы в посеве на единицу объема можно выразить в виде:

$$M_v(I, \tau, L) = F(I)[1 - \exp(-KL)] - r_0 M - M_v r_1 / \gamma, \quad (3.26)$$

где  $F(I) = \gamma \lambda \tau I / (\alpha I + \beta)$ ;  $\gamma$  и  $\lambda$  – константы,  $\tau$  – светопериод;  $M$  – сухая биомасса посева на единичной площади;  $r_0$  – коэффициент дыхания поддержания;  $r_1$  – коэффициент дыхания роста;  $M_v$  – выражена в единицах измерения сухой массы.

Примем здесь приближенно, что

$$M = m L, \quad (3.27)$$

где  $m$  – сухая масса листа единичной площади.

На рис. 3.11 изображена кривая  $\bar{M}_v(I)$ , построенная по световой кривой фотосинтеза посева светолюбивых растений, взятой из работы (Шульгин, 1973), и нормированная путем деления на максимальное значение  $M_v^m$ , соответствующее точке  $I = I_p$ .

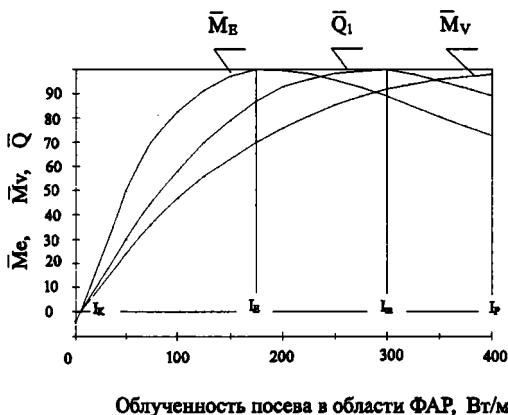


Рис. 3.11. Зависимость удельной производительности космической оранжереи от облученности растений, построенная по световой кривой фотосинтеза посева светолюбивых растений.  $M_V$  – суточная производительность оранжереи на единицу объема в % от максимального значения;  $M_E$  – энергетическая эффективность оранжереи в % от максимального значения;  $\bar{Q}_1$  – компромиссный критерий оптимизации светового режима в оранжерее в % от максимального значения;  $I_K$  – световой компенсационный пункт;  $I_E$  – облученность, соответствующая максимуму  $\bar{M}_E$  посева;  $I_P$  – облученность, соответствующая максимуму  $\bar{M}_V$  посева;  $I_m$  – облученность, соответствующая максимуму  $\bar{Q}$  посева.

Подставив выражение (3.26) в (3.22), с учетом (3.27) после преобразований получим:

$$M_E(I) = \frac{\gamma[1 - \exp(-KL)]}{\delta(1 + \tau/\gamma)(\alpha I + \beta)} - \frac{r_0 mL}{\gamma \delta(1 + \tau/\gamma) \tau I} \tag{3.28}$$

Анализ функции (3.28) показывает, что она имеет максимум в точке:

$$I_E = \frac{\beta \sqrt{\delta r_0 mL}}{\sqrt{\alpha \tau \lambda} [1 - \exp(-KL)] - \alpha \sqrt{r_0 mL}} \tag{3.29}$$

При принятых выше допущениях кривая  $\bar{M}_E(I)$  подобна по смыслу кривой КПД фотосинтеза посева в зависимости от потока ФАР, падающего на посев. Многочисленные опыты показали, что в посевах растений максимум выражения (4.28) всегда достигается при значениях  $I_E < I_P$  (Шульгин, 1973; Salisbury, Bugbee, 1988). На рис. 3.11 изображена зависимость (3.28), нормированная максимальной величиной  $M_E^m$  и соответствующая той же световой кривой, которая была использована для построения графика  $\bar{M}_V(I)$  на том же рисунке. Можно видеть, что максималь-

ные значения производительности оранжереи на единицу объема и ее энергетической эффективности достигаются при разных значениях интенсивности ФАР.

В разделе 3.1 мы уже отметили, что для любого фиксированного светового потока можно получить структуру посева с максимальной для заданного уровня освещения скоростью фотосинтеза, а следовательно и продуктивностью, подбирая густоту посева таким образом, чтобы выполнялось условие  $L = L_0$ , где  $L_0$  определяется из формулы (3.15). Таким образом, для каждого выбранного светового режима при фиксированных условиях среды обитания растений определенного возраста можно выбрать оптимальную густоту посева, обеспечивающую его максимальную энергетическую продуктивность. Изменение оптимального листового индекса в онтогенезе осуществляется с помощью различных методов раздвижения растений в посевах, описанных в разделе 3.1 и ниже в главе 5.

#### 3.2.2.4. Критерии и процедура оптимизации параметров светового режима в космических оранжереях

Итак, наш анализ показал, что в широком диапазоне варьирования интенсивности света, падающего на посев растений, не существует оптимального светового режима, который обеспечивал бы одновременно максимум производительности оранжереи на единицу ее объема и максимум энергетической эффективности оранжереи. Следовательно, для выбора наилучших параметров  $I$  и  $\tau$  для светового режима в оранжерее в этом случае требуется сформировать некий компромиссный критерий. В качестве такого критерия логично предложить свертку упомянутых критериев в виде максимума линейной комбинации величин  $M_V$  и  $M_E$  с весовыми коэффициентами, отражающими соотношение значений стоимости основных используемых бортовых ресурсов – единицы объема кабины космического аппарата и единицы производимой в нем электроэнергии:

$$Q_1(I, \tau, L) = M_V(I, (I, \tau, L) \cdot [c_v / (c_v + c_E)] + M_E(I, \tau, L) \cdot [c_E / (c_v + c_E)], \quad (3.30)$$

где  $c_v$  – стоимость единицы электроэнергии, потребляемой оранжереями на борту космического объекта,  $c_E$  – стоимость единицы объема, занимаемого оранжереями на борту;  $I_K < I < I_F$ ;  $I_K$  – компенсационный пункт световой кривой.

Оценки  $c_E$  и  $c_v$  могут существенно зависеть как от конструкции космического аппарата, в котором установлена оранжерея, так и от особенностей выполняемой им миссии. В общем случае необходимо в правой части уравнения (3.30) добавить в знаменатели весовых коэффициентов слагаемыми стоимость других бортовых ресурсов, перечисленных в разделе 3.1. Однако стоимостные оценки для этих ресурсов для будущих космических экспедиций, как уже отмечалось выше, носят ориентировочный характер. Как было показано в работе (Менькин, 1999), в случае неопределенности исходной информации при формировании количественных критериев эффективности для

синтеза СЖО целесообразно использовать мультипликативные количественные модели эффективности. Для случая оптимизации светового режима в космической оранжерее мы предложили в качестве компромиссного критерия величину:

$$\max Q_1(I, \tau, L) = \max [M_E \cdot M_V]. \quad (3.31)$$

Легко видеть, что критерий  $Q_1$  является упрощенным вариантом более общего критерия эффективности  $Q$  из выражения (3.10), предложенного нами в разделе 3.1.1.

Анализ функции (3.31) с учетом выражений (3.26) и (3.28) показывает, что для любой конкретной световой кривой посева она имеет локальный экстремум в некоторой точке  $I_m$ ;  $I_E \leq I_m \leq I_F$ . Этот вывод подтверждается нижеприведенными экспериментальными данными.

На рис. 3.11 показан график нормированных значений критерия:

$$\bar{Q}_1 = Q_1(I) / Q_{1m} = (M_V / M_V^m) \times (M_E / M_E^m) \quad (3.32)$$

Здесь  $Q_{1m}$  – максимальное значение  $Q_1$  в исследованной области параметров светового режима.

Таким образом, критерий (3.31) или (3.32) позволяет определить оптимальную облученность для посевов растений в оранжерее, основываясь лишь на их экспериментально полученных световых кривых.

Из уравнений (3.26) и (3.28) следует, что значения удельной производительности оранжереи, использованные для вычисления критериев (3.31) или (3.32), зависят не только от плотности светового потока и светопериода, но и от листового индекса. Величина  $L$  в посевах существенно изменяется с возрастом растений, следовательно, и оптимальные световые режимы должны изменяться по мере роста растений. Для случая оранжереи с конвейерным посевом растений отсюда, в частности, следует, что в случае реализации системой освещения оптимальных световых режимов, выбранных по критерию (3.31) или (3.32) и различных для каждого шага, для всего посева в целом будет обеспечиваться больший суммарный экстремум  $\max Q_1(I, \tau, L)$ , чем при любом  $Q_1$  – оптимальном световом режиме, одинаковом для всех шагов конвейера. Различные световые режимы на первых трех и на остальных семи шагах конвейерного посева были реализованы, например, в конвейерной космической оранжерее «Витацикл» (Berkovich et al., 1997).

Несмотря на сравнительно простую форму выражений (3.31) и (3.32), трудно ожидать, что любая формальная процедура поиска экстремума соответствующих функций с эмпирическими оценками констант  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$ ,  $\tau_0$ ,  $\tau_1$  и  $K$  в пространстве параметров оптимизации  $I$ ,  $\tau$  и  $L$  сможет обеспечить точное получение оптимального светового режима в посеве. Основными причинами этого является как нестабильность указанных констант в допустимой области изменений перечисленных параметров, так и нестационарность этих констант, а также листового индекса в посеве в онтогенезе. Вследствие этого поиск статистически уточненной совокупности параметров наилучшего светового режима в космической оранжерее с одновозрастным посевом растений наиболее эффек-

тивно было бы проводить с помощью адаптивных поисковых систем, которые будут описаны нами в разделе 3.2.6. Однако в настоящее время такие системы не получили распространения, поэтому более доступен для решения данной задачи метод D-оптимального (с минимальной дисперсией) многофакторного эксперимента. В частности, с помощью трехфакторного вегетационного эксперимента (факторы I,  $\tau$  и L) в течение времени, равного длительности товарной вегетации, можно найти статистически достоверные оптимальные значения параметров светового режима для одновозрастного посева в космической оранжерее. Для конвейерных оранжерей, в которых возможна организация раздельного освещения на разных шагах конвейера, необходимо проводить четырехфакторный эксперимент с включением в качестве дополнительного фактора возраста растений с шагом варьирования, равным шагу конвейерного посева. Из теории планирования многофакторных экспериментов (Налимов, 1971) известно, что полный нелинейный оптимальный план 3-факторного эксперимента содержит не менее 27 опытов, а 4-факторного – не менее 81. С учетом необходимости повторностей опытов такие исследования становятся чрезвычайно трудоемкими даже в случае применения усеченных планов экспериментов. Однако в ряде практически важных случаев можно минимизировать потребное число опытов с учетом дополнительных условий.

### 3.2.2.5. Выбор параметров светового режима для космических оранжерей в частных случаях

**Случай 1.** Низкая интенсивность светового потока от светильника оранжереи, т. е.  $I < I_E$ . Этот случай наиболее часто встречается в современной практике, когда жесткие ограничения на потребляемую мощность и на тип бортовых источников света заставляют применять в космических оранжереях люминесцентные светильники со светом низкой интенсивности (оранжереи «Светоблок», «Оазис», PGU и др.). В этом случае плотность светового потока от светильника в области ФАР обычно не превышает значений  $30 \pm 40 \text{ Вт/м}^2$ . Для большинства зеленых сельскохозяйственных культур эти значения лежат на световой кривой в диапазоне  $I_K < I < I_E$  даже для сильно разреженного ( $L \leq 1$ ) посева растений (Шульгин, 1973). В этом случае оптимальным режимом для зеленых растений можно заведомо считать круглосуточное освещение, т. к. все три критерия  $M_V$ ,  $M_E$  и  $Q_1$  будут возрастать с увеличением  $\tau$ , достигая максимума при  $\tau = 24$  ч, согласно уравнениям (3.25), (3.28) и (3.32).

Рассмотренный случай можно проиллюстрировать данными наших опытов по выращиванию 45-дневных посевов горчицы листовой (*Brassica juncea* L.), сорт «Муравушка». Растения культивировали в лабораторных условиях в вегетационных сосудах, заполненных перлитом, на питательном растворе Чеснокова, под люминесцентными лампами белого света при потоке ФАР на уровне верхних листьев  $28 \pm 2 \text{ Вт/м}^2$  и фотопериодах 12, 16 и 20 ч в сутки, а также на непрерывном свете. Температуру воздуха поддерживали в пределах  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , относительную влажность

воздуха –  $50 \pm 5$  %. Значения критериев оптимальности, вычисленных по результатам опытов, приведены на рис. 3.12. Продуктивность в опытах оценивали по средней массе растения, энергетическую эффективность вычисляли по уравнению (3.22), а компромиссный критерий  $\bar{Q}_1$  – по уравнению (3.32). Можно видеть, что максимумы критериев оптимальности режима освещения при любом возрасте растений достигались при  $\tau = 24$  ч.

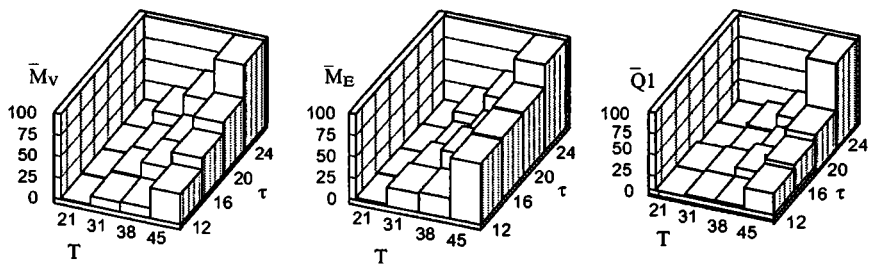


Рис. 3.12. Критерии оптимизации светового режима для посевов листовой горчицы в разном возрасте при облученности в области ФАР  $28 \text{ Вт/м}^2$ .  $\bar{M}_v$ ,  $\bar{M}_E$  и  $\bar{Q}_1$  – суточная производительность оранжереи на единицу объема, энергетическая эффективность и компромиссный критерий оптимизации посевов, соответственно в % от максимального значения для каждого критерия; T – возраст растений, сут;  $\tau$  – светопериод, ч/сут

**Случай 2.** Оранжерея с одновозрастным посевом с фиксированной густотой посадки растений. Этот случай имеет место в оранжереях для производства растительной продукции, хорошо переносящей хранение (например, зерна), или в исследовательских оранжереях с небольшой посадочной площадью. Известны многочисленные эмпирические оценки оптимальной густоты, а следовательно, и листового индекса для посевов основных зерновых культур. Таким образом, для выбора светового режима в таких посевах можно ограничиться двухфакторным экспериментом с оценкой продуктивности (или средней массы растения) при варьируемых значениях потока ФАР и фотопериода. Далее, аналогично случаю 1, вычисляют значения критерия  $Q_1$  для каждого опыта и строят поверхности (или диаграммы)  $Q(I, \tau)$ , по которым определяют оптимум.

**Случай 3.** Конвейерная оранжерея с фиксированной густотой посадки. В этом случае густота посадки растений задается из технологических соображений и предварительных опытов. Например, в каждом корневом модуле космической оранжереи «Свет» были предусмотрены два посадочных устройства в виде планок с фиксированным количеством гнезд для семян, т. к. слишком близкие расстояния между растениями могли затруднить измерения морфометрических показателей растений и отбор промежуточных проб в исследовательской оранжерее. Аналогичная конструкция посадочных устройств применена в вышеупомянутой конвейерной витаминной оранжерее

«Витацикл» (Berkovich et al., 1997). Как мы отметили выше, оптимизация светового режима в конвейерных оранжереях сводится к выбору величин плотности светового потока и фотопериодов для различных шагов растительного конвейера по критерию  $\max \bar{Q}_1(I, \tau, T)$ , где  $T$  – возраст растений. В качестве примера на рис. 3.13 даны диаграммы значений критериев качества работы оранжерей с посевом растений капусты пекинской *Brassica pekinensis* (Lour) Rupr, сорт «Хибинская». Для построения диаграмм использовали данные, полученные в работе Хованской (1976). Растения выращивали в термостатированном помещении в почвенной культуре при освещении лампами накалывания с водным экраном. Представленные данные позволили выявить, что максимальная продуктивность посевов во всех возрастах имела место при круглосуточном освещении и максимальной плотности светового потока  $150 \text{ Вт/м}^2$ . Максимум энергетической эффективности для 15-дневных растений достигался при той же плотности светового потока и при значениях фотопериода 16 ч, однако для растений в 25- и 30-дневном возрасте интенсивность света, соответствующая максимуму  $M_E$ , снижалась до  $50 \text{ Вт/м}^2$ , а оптимальный фотопериод лежал в диапазоне от 16 до 20 ч в сутки. Максимум компромиссного критерия  $\bar{Q}_1$  достигался для 15-дневных растений при тех же значениях  $I$  и  $\tau$ , что и максимум энергетической эффективности, но с изменением возраста растений до 25 дней координаты максимума  $\bar{Q}_1$  существенно изменились:  $100 \text{ Вт/м}^2$  и 20 ч, а для 30-дневных растений –  $50 \text{ Вт/м}^2$  и 16 ч в сутки. Диаграммы на рис. 3.13 дают возможность оценить оптимальный режим освещения и в других частных случаях. Например, светильник витаминной оранжереи «Витацикл» обеспечивает плотность светового потока ФАР около  $100 \text{ Вт/м}^2$ , и, на первый взгляд, можно было бы рекомендовать выращивать пекинскую капусту в этой установке при 20-часовом фотопериоде. Следует, однако, помнить, что координаты максимума величины  $Q_1$  могут зависеть от спектральной характеристики источника света в оранжерее, поэтому, строго говоря, для оранжереи «Витацикл» необходимо повторить описанную серию опытов под люминесцентными лампами.

Согласно диаграмме на рис. 3.13 при  $I = 100 \text{ Вт/м}^2$  максимальное значение критерия  $\bar{Q}_1$  достигается для растений листовой капусты в съемном возрасте 30 дней при фотопериоде 20 ч/сут. Однако на первых шагах конвейерного посева (до возраста 9 дней) при фотопериоде 20 час/сут оптимум  $\bar{Q}_1$  достигался в наших условиях при плотности светового потока около  $50 \text{ Вт/м}^2$ . Вследствие этого на трех первых шагах конвейера уровень ФАР был весьма большим ( $50 \text{ Вт/м}^2$ ), а спектральный состав света отличался от такового в реальной космической оранжерее, поэтому точность определения параметров светового режима по диаграммам на рис. 3.13 вряд ли достаточна для практического применения. Тем не менее описанная процедура показывает, как можно проектировать эффективные планы наземных вегетационных экспериментов для конкретных видов посевов в космических оранжереях и выбирать оптимальные световые режимы по предложенным нами критериям.



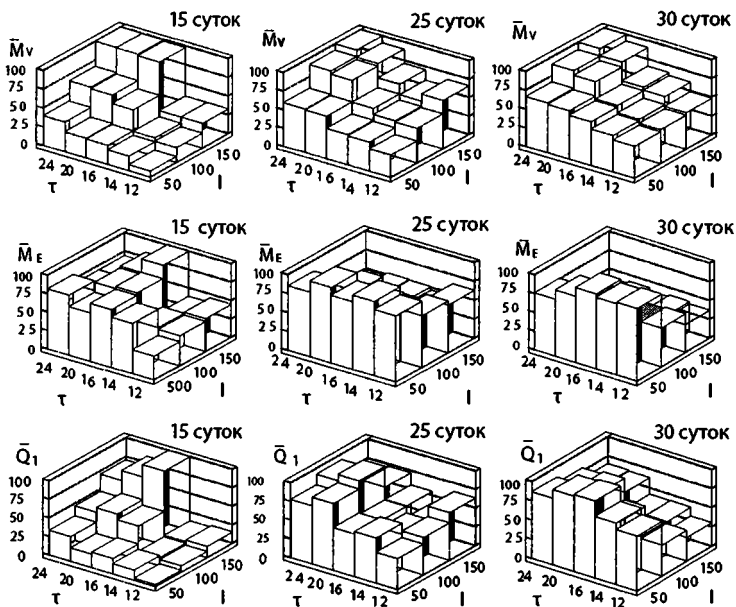


Рис. 3.13. Критерии оптимизации светового режима для посевов листовой капусты в разном возрасте при облученности в области ФАР до  $150 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .  $\bar{M}_v$ ,  $\bar{M}_E$  и  $\bar{Q}_1$  – суточная производительность оранжереи на единицу объема, энергетическая эффективность и компромиссный критерий оптимизации посевов, соответственно, в % от максимального значения для каждого критерия;  $\tau$  – светопериод, ч/сут;  $I$  – облученность в области ФАР  $\text{Вт}/\text{м}^2$

### 3.2.2.6. Выбор длительности товарной вегетации в космических оранжереях

Предложенный в разделе 3.2.2.2 компромиссный критерий качества светового режима позволяет обоснованно выбирать длительность товарной вегетации для зеленных культур в производственных космических оранжереях. В наземном овощеводстве защищенного грунта длительность товарной вегетации определяют эмпирически, исходя, в основном, из требований к качеству получаемой продукции. Однако такие требования, за исключением нескольких количественных ограничений по составу биомассы (содержание нитратов, витаминов и т. д., носят качественный характер (внешний вид, органолептические свойства и др.) и существенно зависят от квалификации специалистов. Рекомендации по срокам уборки урожая в условиях защищенного грунта даются с допуском в 10–20 дней (Смирнов, 1980). Такие подходы малопригодны для определения длительности товарной вегетации и шагов конвейерного посева в конвейерной зеленой оранжерее в

условиях космического полета, т. к. могут приводить к значительному перерасходу потребления энергии и расходных материалов (почвозаменителя, семян и т. д.) на единицу продукции и, соответственно, к увеличению эквивалентной массы оранжерей.

С целью более точного выбора длительности товарной вегетации зеленных культур в космической оранжерее мы разработали процедуру, основанную на использовании компромиссного критерия  $Q_1$  (Berkovich et al., 2001). Диаграммы на рис. 3.13 иллюстрируют эмпирическую зависимость величины критерия от возраста листовой капусты. За оптимальную длительность товарной вегетации мы приняли такой возраст растений,  $T$ , который соответствует условию:

$$Q_1(I, \tau, T) = \max Q_1(I, \tau, t_i); i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.33)$$

где  $n$  – число шагов конвейерного посева,  $t_i$  – возраст растений на  $i$ -том шаге.

Методика определения длительности товарной вегетации состоит в следующем.

- Из характеристики культивируемого вида и сорта растений устанавливается предполагаемая максимальная длительность вегетации в условиях опыта.
- Планируется вегетационный опыт по выращиванию конвейерного посева растений с такой же структурой и при условиях, максимально приближенных к условиям среды в космической оранжерее. Длительность опыта должна хотя бы на три–четыре шага превышать предполагаемую максимальную длительность вегетации.
- После вывода конвейерного посева на стационарный режим первые два урожая конвейерного посева снимаются в возрасте, превышающем предполагаемую максимальную длительность вегетации на 3–4 дня, и не используются в расчетах для вычисления динамики продуктивности, поскольку в корневом модуле №1 растения растут без затенения со стороны растений предыдущего посева, а в корневом модуле №2, напротив, в значительной мере затенены растениями в корневом модуле №1. Расчеты показателей удельной продуктивности начинают проводить с уборки 3-го шага от начала опыта. При достижении съемного возраста растениями  $n$ -го шага убирают одновременно с растениями  $n$ -го шага растения со всех шагов конвейера, начиная с 4-го. Обычно масса растений до 4-го шага конвейера составляет лишь несколько процентов от биомассы посева в съемном возрасте, поэтому младшие шаги не принимают во внимание в процессе оптимизации. Определяют сухую массу,  $m_i$ , убранных растений на каждом шаге конвейера.
- Определяют среднюю продуктивность по сухой массе на каждом убранным шаге конвейера:  $P_i = m_i / T_i$ , где  $T_i$  – возраст растений в конце  $i$ -го шага конвейера.
- Вычисляют количество энергии ФАР, поданное на посев для каждого убранным шага конвейера по формуле:

$$W_i = \tau t_i \sum_{j=1}^i I_j \cdot (S_L)_j \quad I = 4, 5, \dots, n, i > j, \quad (3.34)$$

где  $I_j$  – облученность посева на уровне верхних листьев на  $j$ -том шаге конвейера ( $Вт/м^2$ );  $\tau$  – фотопериод (ч/сут);  $t_i$  – возраст растений (сут) в конце  $i$ -того шага конвейера;  $(S_L)_j$  – освещаемая площадь посева на  $j$ -том шаге ( $в м^2$ ). Для посева на плоской поверхности освещаемая площадь совпадает с посадочной, но для самораздвигающихся посевов на выпуклой посадочной поверхности, которые будут описаны в главе 5, освещаемая площадь зависит от формы посадочной поверхности и высоты растений. В последнем случае значения  $(S_L)_j$  будут различны для каждого значения  $j$ . Например, для конструкции оранжереи «Фитоцикл», описанной в главе 4, имеем зависимость следующего вида:  $(S_L)_j = 2(\pi/n) l (h+H_j)$ . Здесь  $l$  – длина вегетационной камеры;  $n$  – количество шагов конвейера;  $h$  – высота корнеобитаемой зоны;  $H_j$  – высота побегов растений на  $j$ -том шаге конвейера.

- Вычисляют для каждого шага конвейера показатель  $Q_i$  оптимальности товарной вегетации, пропорциональный, как следует из уравнений (3.32), (3.18) и (3.19), критерию  $Q_i$ :

$$Q_{ti} = \frac{P_i^2}{S_i W_i}; \quad i = 4, 5, \dots, n. \quad (3.35)$$

Здесь  $\gamma = \text{const}$ . В случае традиционной структуры посева на плоской посадочной поверхности значения  $S_i$  одинаковы для всех  $i$ , поэтому в качестве критерия оптимальности можно вычислять величину  $P_i^2 / W_i$ .

- Определяют номер  $i_0$  оптимального шага конвейера, которому соответствует максимальное значение указанного выше показателя. Считают возраст растений в конце оптимального шага конвейера равным оптимальной длительности,  $T_0$ , товарной вегетации растений в условиях опыта.

Необходимо отметить, что в случае оранжереи с конвейерными самораздвигающимися посевами, в которых освещаемая площадь посева меняется от шага к шагу, описанная нами методика будет давать приближенное значение  $T_0$ . Действительно, при новом шаге конвейера, равном  $T_0/n$ , согласно уравнению (3.34), количество энергии ФАР, поданной на посев последнего шага конвейера, к моменту уборки растений будет составлять величину:

$$W_0 = \tau T_0 \sum_{j=1}^n I_j (S_L)_j. \quad (3.36)$$

В предварительном же опыте количество энергии ФАР, поданное на посев шага конвейера с оптимальным номером  $i_0$ , будет равно:

$$W_{i_0} = \tau T_0 \sum_{j=1}^{i_0} I_j (S_L)_j. \quad (3.37)$$

Очевидно, что даже при  $I_j = \text{const}$  для любого  $j < n$  при условии  $i_0 < n$  выполняется неравенство:

$$\sum_{j=1}^k (S_L)_j < \sum_{j=1}^n (S_L)_j, \quad (3.38)$$

и следовательно,  $W_0 > W_{10}$ .

Опираясь на предполагаемую максимальную длительность вегетации, по описанной методике, как правило, сокращают длительность товарной вегетации не более чем на 2–3 шага первоначального опыта. Вследствие этого ошибка в выборе  $T_0$  чаще всего не превышает длительности одного шага конвейера. Для дальнейшего уточнения значения  $T_0$  можно провести вторую итерацию вегетационного опыта по указанной методике, но с предполагаемой максимальной длительностью вегетации, равной найденному на первом этапе значению  $T_0$ .

Следует иметь в виду, что предложенный критерий  $Q_T$  для выбора длительности товарной вегетации зеленных культур направлен на оптимизацию энергетических характеристик космической оранжереи. Однако можно представить себе случай, когда ухудшение показателей качества получаемой биомассы для выбранной культуры наступает в более раннем возрасте, чем определенный по нашей методике. Во избежание подобных ограничений необходимо контролировать основные качества биомассы, убираемой с различных шагов конвейера в вегетационном опыте, например вкусовые качества, содержание витаминов, нитратов и т. д.

Проиллюстрируем выбор параметра светового режима  $T_0$  с помощью разработанной методики для случая посева пекинской капусты в спиральной оранжерее «Фитоцикл», описанной в главе 4. Условия проведения вегетационного опыта представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Условия проведения опыта с конвейерным посевом капусты пекинской в оранжерее «Фитоцикл»

Температура воздуха, °С	27±1
Относительная влажность воздуха, %	36±1
Источник освещения	люминесцентные лампы белого света
Облученность ФАР на уровне верхних листьев, Вт/м <sup>2</sup>	25 ±3 для шагов 1–5; 30 ±3 для шагов 6–10
Режим освещения	непрерывный в течение вегетации
Тип почвозаменителя в корневом модуле	ионитный волокнистый почвозаменитель «БИОНА-В3»
Диапазон колебаний водного потенциала в корнеоби-таемой зоне, кПа	–0,5÷+2,5
Количество растений в корневом модуле	12
Сроки уборки, дни	24; 28; 32; 36; 40

В табл. 3.5 даны значения освещаемой поверхности посева растений и характеристики производственного процесса по шагам конвейера.

Таблица 3.5

Характеристики посева пекинской капусты по шагам растительного конвейера в оранжерее «Фитоцикл»

Показатели	Номер шага конвейера				
	6	7	8	9	10
Освещаемая поверхность посева, ( $S_L^E$ ) <sub>i</sub> , м <sup>2</sup>	0,39	0,50	0,61	0,72	0,85
Сухая масса съедобной части посева в корневом модуле, г	9,20	29,04	39,12	44,16	49,46
Средняя продуктивность посева по сухой биомассе съедобной части, m <sub>i</sub> , г/ч	0,0159	0,0432	0,0509	0,0511	0,0551
Количество энергии ФАР, поданное на посев, W <sub>i</sub> , кВт-ч	3,86	4,75	6,28	8,44	11,52
Доля съедобной массы в массе побега, %	96±1	89±3	94±4	88±3	92±3

На рис. 3.14 изображена зависимость критерия оптимальности светового режима от длительности вегетации пекинской капусты в спиральной оранжерее «Фитоцикл» для двух итераций, определенная по предложенной методике. Принимая во внимание, что доля съедобной части полученной биомассы листовой капусты, согласно органолептическим показателям, не снижалась даже в возрасте 40 дней, мы определяли оптимальную длительность вегетации на основании Q<sub>T</sub> критерия. Согласно данным на рис. 3.14 оптимальное значение длительности товарной вегетации для пекинской капусты в условиях опыта было принято равным 30 дням.

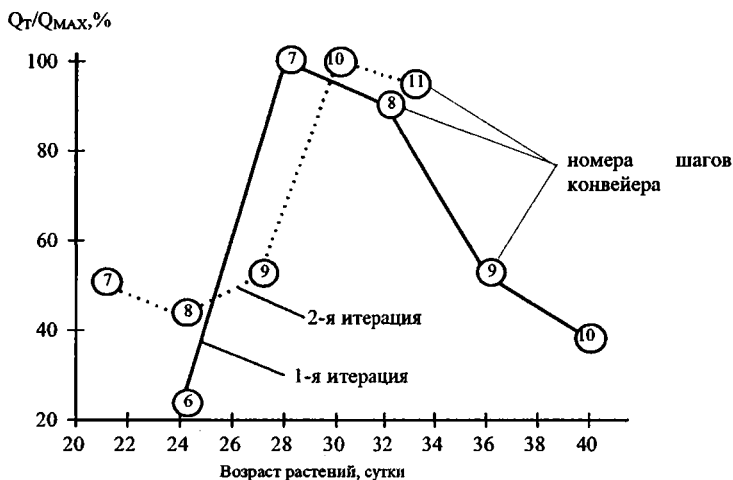


Рис. 3.14. Зависимость нормированного критерия оптимальности,  $Q_T/Q_{MAX}$ , от длительности вегетации капусты пекинской в оранжерее «Фитоцикл»

Итак, материалы данного раздела позволяют конструктору обоснованно выбирать основные параметры светового режима, а также оптимальную длительность вегетационного периода при выращивании посевов растений с известной структурой в космических оранжереях с известными характеристиками светильника. Необходимо подчеркнуть, что для правильного выбора необходимо проведение наземных вегетационных опытов по указанному нами плану с посевами именно тех видов растений и с той посевной пространственной и временной структурой, которые планируются к использованию в конкретной космической оранжерее. Отклонения от указанной методики приводят к понижению точности выбора режимов и снижению показателей качества работы космической оранжереи.

### 3.2.3. Система корневого снабжения

Под корневым снабжением мы понимаем обеспечение в корнеобитаемой зоне вегетирующих растений следующих функций:

- обеспечение необходимыми нутриентами при допустимом соотношении их концентраций;
- обеспечение поддержания кислотности среды в допустимом диапазоне;
- обеспечение корнеобитаемой зоны водой при допустимых значениях водного потенциала;
- обеспечение корнеобитаемой зоны кислородом в допустимой концентрации;
- удаление из корнеобитаемой зоны продуктов метаболизма корней, в частности углекислого газа, этилена и жидких корневых выделений.

### 3.2.3.1. Обзор методов корневого снабжения

Сравнительный анализ и классификация известных наземных способов выращивания растений в искусственных условиях был проведен во многих работах (Рождественский и Клешнин, 1980; Симитчиев и др., 1983; Вегу и Knight, 1997; Ермаков, 1987). Наиболее детальной нам представляется классификация методов корневого снабжения в работе (Ермаков, 1987), подразделяющая их на 5 групп:

1. геопонику (почвенную культуру);
2. агрегатопонику (на гранулированных средах);
3. гидропонику (на жидких солевых растворах);
4. аэропонику (воздушную культуру);
5. аэрогидролитопонику (на пленочных пористых средах).

Как видим, в основу такой классификации были положены физические свойства корнеобитаемой среды. Однако в процессе развития космического растениеводства выявилась потребность в дополнительном управлении рядом процессов в корнеобитаемой среде, которые протекают в условиях микрогравитации отличным от наземных условий образом. Соответственно, известная классификация не могла охватить все разновидности систем корневого снабжения для космических оранжерей.

Существующие попытки расширения такой классификации по отдельным характеристикам: пассивные и активные системы (Heuenga, 1996; Heuenga, 1997; Goins et al., 1997), однофазные и двухфазные (Heuenga, 1996; Heuenga, 1997), системы с принудительной капиллярной пропиткой (Подольский, 2000), также, на наш взгляд, не отражают всех особенностей в обеспечении корневого снабжения растений.

На базе анализа разработанных к настоящему времени методов мы расширили классификацию характеристик систем корневого снабжения растений до вида, изображенного на рис. 3.15. Пользуясь этой классификацией, мы представили в табл. 3.6. основные характеристики для ряда описанных в литературе современных корневых модулей различных космических оранжерей, предназначенных для работы в условиях микрогравитации. Отметим кратко общие особенности известных систем корневого снабжения в космических оранжереях.

Условия микрогравитации затрудняют применение систем с водной корнеобитаемой средой, поскольку в этом случае необходима более надежная гидронизоляция корневого модуля, а также принудительная сатурация питательного раствора кислородом. Проблемой при создании жидкопенистой среды является подбор адекватных вспенивателей. Вследствие указанных трудностей упомянутые системы пока не нашли применения в космических оранжереях. Аэрозольная корневая среда была создана и опробована в наземных условиях в вышеупомянутых аэропонных

космических оранжереях «Карусель» и «Гидросистема». Хотя такие системы создают хорошие условия для снабжения корней кислородом и облегчают раздвижение растений в посевах (Рождественский и Клешнин, 1980), распыление питательного раствора, сбор его излишков и текущий контроль за его составом вызывают значительные затруднения в условиях космического полета. Например, в КО «Карусель» применяют вращение вегетационных сосудов со скоростью 40 об/мин для создания центробежных потоков аэрозоля в корнеобитаемой зоне. Это требует дополнительных затрат энергии, снижает надежность функционирования и сообщает возмущающий вращательный момент кабине космического аппарата. Кроме того, как показали наши опыты с установкой «Гидросистема», описанные в работе (Беркович и др., 1996), распыляемые форсунками капли с высокой кинетической энергией могут повреждать корешки у некоторых видов растений на ранних стадиях развития (например, у листовой горчицы на 6–7-й день). В целом, известные аэропонные системы с разбрызгиванием раствора для создания аэрозоля в корнеобитаемой среде пока нельзя считать готовыми к применению в космических оранжереях.

Гелевая корнеобитаемая среда, реализуемая обычно на основе агар-агара, имеет, по мнению автора работ (Неуенга, 1996; Неуенга, 1997), ряд преимуществ: может обеспечивать расчетное содержание нутриентов, воды и кислорода при заданной кислотности среды на заданный срок вегетации, упрощает посадку семян и фиксацию корневой системы в условиях микрогравитации, допускает предварительную стерилизацию, позволяет в ряде случаев визуально наблюдать за развитием корней, не требует дополнительных операций полива и аэрации в течение определенного периода использования. Однако очевиден и основной недостаток таких систем: в гелевой среде коэффициенты диффузии веществ на порядок ниже, чем в газовой (Никольский, 1968). Это обстоятельство при интенсивном культивировании посевов растений может приводить, с одной стороны, к возникновению дефицита нутриентов и условий гипоксии в окрестностях растущей части корневой системы (Porterfield et al., 2000), с другой – к самоотравлению растений за счет затрудненного оттока корневых выделений. В целом, подобные системы оправданно применяются в исследовательских оранжереях для сравнительно кратковременных опытов с небольшими растениями.

В космических оранжереях, предназначенных для интенсивного культивирования посевов растений, в настоящее время применяют, в основном, корневую среду с так называемой твердой матрицей: гранульную, твердопенистую и волокнистую, а также металлокерамические или полимерные пористые мембраны. Характерной особенностью такой среды является наличие пор, перенос воды в которых происходит, наряду с пародиффузионными эффектами, главным образом за счет капиллярного течения по направлению градиента полного водного потенциала. Наличие капиллярных эффектов в твердоматричной корнеобитаемой зоне облегчает контроль и поддержание адекватного увлажнения и аэрации, особенно при отсутствии постоянной силы тяжести.



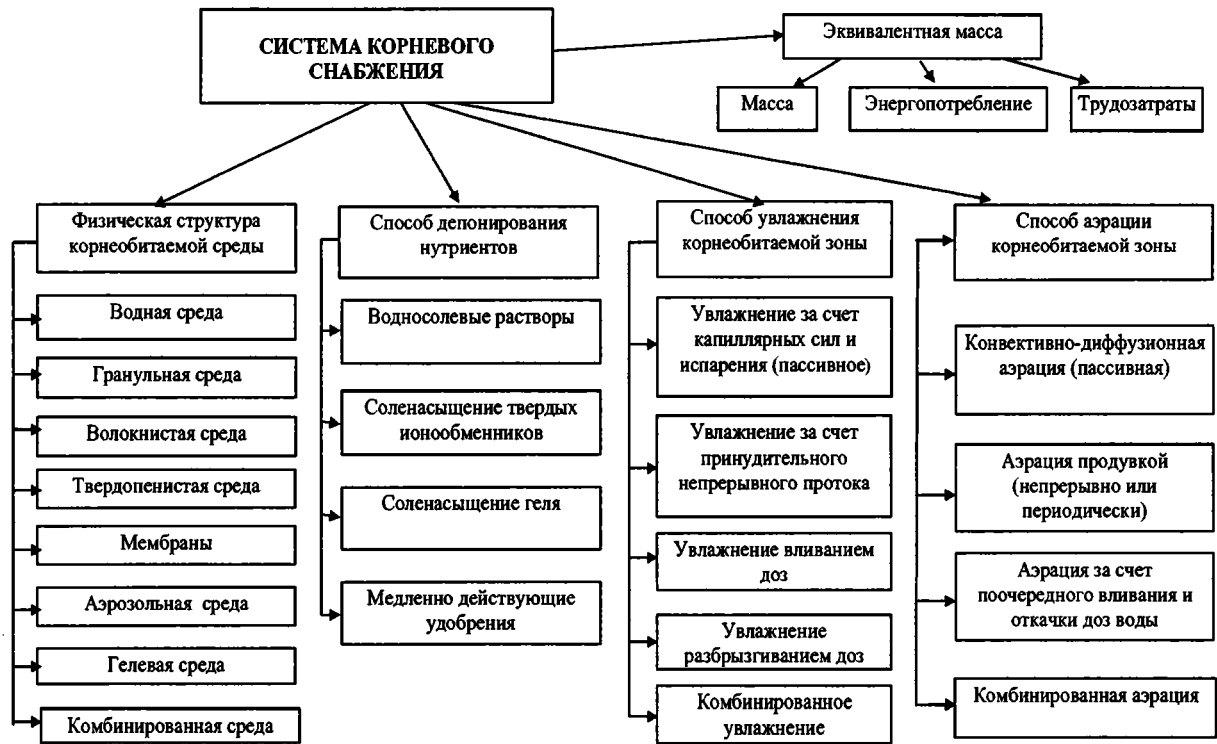


Рис. 3.15. Основные характеристики системы корневого снабжения растений

Таблица 3.6

## Основные характеристики систем корневого снабжения растений для некоторых космических оранжерей

Название КО, изготовитель	Структура корнеобитаемой среды	Способ депонирования нутриентов	Метод увлажнения	Метод регулирования влажности	Способ аэрации	Литисточник
1	2	3	4	5	6	7
«Свет», ИМБП Россия, ИКИ БАН, Болгария	агрегатная среда («Балканин»)	Соленасыщение «Балканина»	комбинированный: вливание доз воды с последующей капиллярной миграцией	с обратной связью от датчика влажности среды	периодическая продувка среды воздухом	Ivanova et al., 1990
«Astroculture-1», WCSAR, USA	пористые трубки в агрегатной среде (архилите, цеолите)	Соленасыщение архилита	комбинированный: организация реверсивной капиллярной миграции воды через агрегатную среду	с обратной связью от датчика перепадов давлений между трубками и в газовой среде КО	конвективно-диффузионная аэрация через газозаполненные поры среды	Mottow et al., 1994

1	2	3	4	5	6	7
PRU, KSC et al., USA	пористые трубки в пластиковых чехлах	водносолевой раствор	капиллярная мигра- ция воды через по- ры трубок	с обратной свя- зью от датчика объема воды на поверхности по- ристых трубок	конвективно- диффузионная азрация в зазоре между поверхно- стью трубок и чех- лами	Heathcote et al., 1996
BPS, ORBITEC, USA	пористые трубки в агрегатной среде (архилите)	внесение в архи- лит медленно действующих удобрений	капиллярная мигра- ция воды через по- ристые трубки и в агрегатной среде	с обратной свя- зью от датчика перепада давле- ний внутри тру- бок и в газовой среде КО	конвективно- диффузионная азрация через га- зозаполненные поры среды	Barta, Castillo, 2001
PGBA, BioServe Space Techn., USA	гелевая (агаризо- ванная) среда или агрегатная среда (почва)	соленасыщение геля или запас нутриентов в почве	увлажнение через фитили	с обратной свя- зью по влажно- сти почвы через пористый дре- нажный клапан	диффузионная азрация через гель или конвективно- диффузионная азрация через га- зозаполненные поры агрегатной среды	Hoehn et al., 1997

3.2.3.2. Обеспечение минерального питания растений в космических оранжереях

Растения способны поглощать из окружающей среды в больших или меньших количествах практически все элементы периодической системы, однако лишь определенная группа минеральных элементов необходима им для нормального прохождения жизненного цикла. Данные о потребности растений в том или ином элементе представлены в таблице 3.7. (Садовникова, 1999).

Таблица 3.7

Необходимые минеральные компоненты питания для растений по данным работы (Садовникова, 1999)

№ п/п	Элемент	Потребность растений	№ п/п	Элемент	Потребность растений
1	азот	++	13	кальций	++
2	сера	++	14	бор	+
3	селен	-	5	ванадий	±
4	фосфор	++	16	хром	-
5	калий	++	17	марганец	+
6	мышьяк	-	18	железо	+/++
7	кремний	(++), ±	19	кобальт	±
8	фтор	-	20	никель	(±)
9	хлор	-	21	медь	+
10	иод	-	22	цинк	+
11	натрий	(+)	23	молибден	±
12	магний	++	24	олово	-

Примечание. Обозначения потребности растений в таблице расшифровываются следующим образом: ++ – макроколичества (0,1–1 % от сухого веса растений); + – микроколичества (0,001 % от сухого веса растений); ± – в незначительных количествах (0,0001 % от сухого веса растений), (-) – только по данным некоторых авторов.

В почвах чаще всего наиболее дефицитными являются азот и фосфор, запасы которых в пахотном слое различных почв колеблются в пределах 50 - 200 и 2,3 - 4,4 т/га соответственно (Полевой, 1989).

Состав биомассы растений может меняться в довольно широких пределах в зависимости от вида, условий произрастания и этапа онтогенеза. В табл. 3.8 приведены диапазоны содержания основных минеральных элементов в сухой массе растений. При избыточной концентрации того или иного элемента в корнеобитаемой среде может ухудшаться пищевая ценность хозяйственно-полезной части урожая, а в некоторых случаях – угнетение роста и гибель растений. В частности, при избытке нитратного азота содержание нитратов в побегах, особенно у листовых культур, может в несколько раз превышать ПДК, а при избытке аммонийного азота возможно самоотравление растений, особенно на ранних фазах развития. Избыток кальция в корнеобитаемой среде угнетает процессы окислительного фосфорилирования и фотофосфорилирования, что в конечном итоге

приводит к угнетению роста и снижению урожайности. Кроме того, при «перекармливании» растений кальцием в тканях в избытке накапливаются труднорастворимые оксалаты кальция, что ухудшает пищевую ценность получаемой биомассы. При избытке серы в листьях накапливаются ее неорганические соединения ( $SO_2$ ,  $HSO_3^-$ ,  $SO_3^{2-}$ ), наблюдаются некрозы листьев, прекращение роста и гибель растений. Избыток практически любого микроэлемента токсичен как для самих растений, так и для человека, употребляющего их биомассу в пищу.

Таблица 3.8

Содержание макро- и микроэлементов в сухой массе растений в %

по данным работы (Полевой, 1989)

Макроэлементы		Микроэлементы	
N	1,5–5,0	Zn	0,015–0,06
P	0,2–1,3	Mn	0,001
K	0,5–1,2	Mo	0,0005–0,02
Ca	0,5–3,0	Cu	0,0002
Mg	0,02–3,1	Co	0,00002
S	0,2–1,0	B	0,0001
Fe	0,02–0,08		

Современная теория минерального питания растений в общих чертах была сформирована еще в конце XIX века Ю. Саксом и И. Кнопом, которые показали, что возможно вырастить нормальное растение до полного созревания на водном растворе, содержащем лишь семь минеральных элементов (нутриентов): азот, фосфор, серу, калий, кальций, магний и железо. Эти опыты создали основу для использования гидропонного вегетационного метода, в том числе для водных и песчаных культур. Питательный раствор, разработанный И. Кнопом (табл. 3.9), широко используется до настоящего времени.

Таблица 3.9

Концентрации основных элементов минерального питания в питательных смесях – растворах, применяемых в вегетационных опытах, по данным работы (Солдатов, 1978)

Название питательного раствора	Концентрации элементов в растворе, мг-экв/л				
	N	P	K	Ca	Mg
Прянишниковая	6	3	2	6	2
Арнона-Хогланда	18	6	10	6	4
Кнопа	8,5	3	3,5	7	2,4

Для обеспечения минерального питания в корнеобитаемой зоне в космических оранжереях применяют несколько способов депонирования нутриентов, которые можно подразделить на 2 основных класса: в водносолевых питательных растворах и в ионитных средах, т. е. в соленасыщенных твердых ионообменниках. Первые применяют в аэропонных и гидропонных системах, в

том числе и с твердоматричными корневыми средами, не обладающими высокой сорбционной емкостью (перлит, вермикулит, архилит, гродан и др.) а вторые – в почвенной культуре и в системах с искусственными заменителями почвы (ИЗП), например, такими как «Балканин», «БИОНА-312», «БИОНА-В» и др. Системы с медленно действующими удобрениями (МДУ), где запас солей помещают в капиллярно-пористые оболочки, замедляющие растворение и диффузию ионов в корнеобитаемую зону растений, увлажняемую водой, носят промежуточный характер. Они не используют ионообменные материалы в качестве носителей нутриентов, как это имеет место в ионитных системах.

Для наземных гидропонных систем были созданы сотни составов питательных растворов, например, Прянишникова, Хогланда, Чеснокова и др. Как видно из таблицы 3.9, концентрации минеральных компонентов, эмпирически подобранные для обеспечения нормального роста растений, в этих растворах несколько отличаются. Среди основных требований к питательным растворам для растений в работе (Солдатов и др., 1978; Полевой, 1989) отмечаются следующие:

- наличие всех необходимых растениям ионов, общим количеством 14; при этом 8 из них требуются в очень малых количествах (микроэлементы), а 3 катиона ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) и 3 основных аниона ( $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $H_2PO_4^-$ ) являются обычно макрокомпонентами;
- общая концентрация солей в растворе должна быть близка к концентрации клеточного сока, обычно в 1 л раствора должно содержаться не более 2–3 г солей;
- соотношения концентраций элементов питания должны быть физиологически уравновешенными, т. е. не выходить за установленные пределы;
- значения показателя pH должно находиться в пределах от 4,5 до 6,8.

Для удовлетворения таких требований в процессе культивирования растений в наземной гидропонике применяют замкнутые системы коррекции состав раствора с непрерывным анализом электропроводности, pH, а иногда и концентраций ионов макроэлементов. Попытки построения автоматических систем коррекции питательного раствора по предварительно найденным эмпирическим зависимостям потребления отдельных элементов питания от возраста растений или по показаниям датчиков прироста биомассы растений (Рождественский и Клешнин, 1980; Цветкова и Вильямс, 1978) не привели к успеху из-за накопления в них расхождений между оценками, полученными по статистической модели, и реальными значениями параметров среды в корневой зоне, приводящих к постепенному смещению соотношения концентраций ионов в питательном растворе. До настоящего времени не сообщалось также ни об одной готовой системе коррекции питательного раствора первого типа, пригодной для космического применения. Причиной служит, по мнению авторов обзора (Cloutier et al., 1997), «технологический вакуум» в области создания адекватных ионоселективных датчиков. Отсутствие системы автоматической коррекции задерживает применение водносолевых питательных растворов в космических оранжереях длительного ис-

пользования, нестабильных из-за неконтролируемых обменных процессов между корнями растущих растений и раствором, развития микрофлоры и седиментации нерастворимых солевых частиц при изменении рН или температуры.

Более устойчивой корнеобитаемой средой являются естественные почвогрунты. Согласно современным представлениям о почвенно-поглощающем комплексе, органические и минеральные вещества удерживаются в почве разными способами: механическим путем, физическими взаимодействиями, химическим и биологическим связыванием веществ (Полевой, 1989; Пинский, 1997). Особое значение имеет физико-химическая, или обменная адсорбция, которая осуществляется неорганической (цеолитной) и органической (гумусовой) компонентами почвы. В основном почвы обладают свойствами катионообменников благодаря наличию кислых групп органической (гуминовые и фульвокислоты) и неорганической (силикатные группы) частей почвы. Вместе с тем в почвах есть и анионсвязывающие группы. Запас ионов биогенных элементов на единицу объема у твердых ионообменников может быть много больше, чем в питательных растворах. Особенно велики значения емкости поглощения ионов у органических ионообменников, например в гумусе почвы (Пинский, 1997). Вследствие этого соленасыщенные ионообменники дольше, чем питательные растворы, сохраняют приемлемые для растений эффективные концентрации нутриентов в течение вегетации. Кроме того, ионообменники обладают способностью поглощать значительное количество ионов водорода, сохраняя рН среды в процессе корневого питания растений.

Одним из важнейших показателей способности почвы обеспечивать жизнедеятельность растений, является обменная кислотность. Наиболее благоприятным диапазоном кислотности почвенного раствора считается диапазон рН от 6,0 до 7,5. При закислении почв снижается растворимость большинства минеральных солей, что снижает их доступность для растений. Ионообменные свойства почв обычно замедляют изменения кислотности в почвенном растворе вследствие потребления минеральных элементов растениями или при внесении удобрений. Значительное число химических реакций, протекающих в почве, являются окислительно-восстановительными (Садовникова, 1999). Активными окислителями являются кислород, галогены, а также  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$ ,  $As$  и  $V^{5+}$ ,  $Cr^{6+}$ ; активными восстановителями являются  $Fe^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $S^{2-}$ . Важную роль в процессах связывания, миграции и трансформации химических элементов играют алюмосиликатные и органические коллоиды, имеющие отрицательный заряд и обладающие значительной способностью к сорбции катионов калия, бария, никеля, кобальта, меди, цинка, магния, золота. Коллоиды гидроксидов железа адсорбируют анионы фосфорной кислоты, ванадия, мышьяка. Поглощительная (ионообменная) способность естественной почвы зависит преимущественно от содержания и минералогического состава илистой фракции, а также содержания органического вещества в почве. Так, в почвах с высоким содержанием гумуса ряд тяжелых металлов, образуя комплексные соединения с органическим веществом, становится менее доступными для растений. В то же время для других

металлов, например железа, образование комплексных соединений (хелатов) способствует повышению их растворимости. Это, с одной стороны, повышает доступность элементов для растений, с другой – способствует переносу металлов поверхностными и грунтовыми водами. В целом, ионообменные свойства корнеобитаемой среды повышают эффективность использования растениями запасенных в ней нутриентов. Следует также обратить внимание на выявленную в работе (Berry et al., 1992) связь между величиной водного потенциала в корнеобитаемой среде и усвоением растениями основных элементов из субстратного раствора. С увеличением водного потенциала в корнеобитаемой среде доля извлечения и, соответственно, ассимиляции растениями элементов К, Са, Mg, Zn, Cu и В также заметно повышалась. Так, увеличение водного потенциала от -3,0 до -0,4 кПа при выращивании пшеницы в 43-дневном эксперименте сопровождалось увеличением содержания калия в биомассе в 1,4 раза, а бора – в 2,2 раза.

В космических оранжереях природные почвы в настоящее время не используют по ряду причин: органические ионообменники почвы, как правило, являются хорошим субстратом для микрофлоры, в том числе и патогенной; при разложении органических веществ почвы выделяются трудно контролируемые газообразные загрязнители; свойства почвы трудно стандартизировать при повторных поставках; удельный вес естественной почвы обычно бывает выше, чем у искусственных заменителей почвы, и т. д.

Чаще всего в качестве капиллярно-пористых почвозаменителей с твердой матрицей в космических оранжереях используют корнеобитаемую среду из соленасыщенных природных цеолитов или искусственных ионообменных смол гранульной или волокнистой структуры, обладающую запасом минеральных компонентов, достаточным для вегетации с запланированной длительностью и продуктивностью. Помимо упомянутого выше гранульного природного цеолита «Балканин», в NASA для исследовательских оранжерей применялся дробленый клиноптилит, положительную оценку получили также два вида апатитов из штатов Теннесси и Северной Каролины (Galindo, 1993). Было показано, что в смесях клиноптилита с апатитом содержится больше питательных веществ, чем в природной почве. При выращивании на них пшеницы, даже при более плотной посадке, чем в полевых условиях, на достаточном уровне обеспечивалось снабжение посевов элементами N, P, K и Ca. Использование соленасыщенных ионообменников является пока единственным способом депонирования нутриентов, с успехом опробованным в условиях микрогравитации для длительного выращивания растений в космической оранжерее «Свет».

В 70-е годы в России и Белоруссии были разработаны несколько типов ионитных почвозаменителей на основе синтетических ионообменных смол в виде смеси гранул анионита и катионита (ИС-2, «БИОНА-211», «БИОНА-312» и др.), а также смеси волокон анионита и катионита (СВ-3, «БИОНА-В», «БИОНА-В3» и др.), основные свойства и технология получения которых описаны в монографии (Солдатов и др., 1978).



Одной из важнейших агрохимических характеристик почвозаменителя на основе солена-сыщенных ионообменников естественной или искусственной природы является потенциал продуктивности субстрата (ППС) (Беркович и др., 1997; Беркович и др., 2001, Berkovich et al., 2003; Подольский, 2000). ППС характеризует максимальное удельное количество сухой биомассы растений, которое можно вырастить на единице массы или объема почвозаменителя. Соответственно, ППС называют весовым (ППСВ), или объемным (ППСО), и между ними существует очевидная связь:

$$\text{ППСВ} = \rho \cdot \text{ППСО}. \quad (3.39)$$

В табл. 3.10 приведены характеристики потенциальной продуктивности некоторых известных ионитных почвозаменителей.

Таблица 3.10

## Характеристики потенциальной продуктивности ионитных почвозаменителей

Название	Весовой ППС, мг/г	Объемный ППС, мг/см <sup>3</sup>
«Балканин» (гранульный)	45	39,1
«БИОНА-312» (гранульный)	90	71,1
ИС-2 (гранульный)	59	36,7
СВ-3 (волокнистый)	52,5	6,37
«БИОНА-В» (волокнистый)	72	10,1

Данные табл. 3.10 свидетельствуют о том, что гранульные почвозаменители в целом имеют существенно больший объемный ППС, обусловленный в первую очередь их большей объемной плотностью, однако по весовому ППС преимущество имеют волокнистые почвозаменители. Следовательно, для получения одного и того же урожая в космической оранжерее гранульных почвозаменителей требуется гораздо меньше по объему, но больше по весу, чем волокнистых. Следует отметить дополнительные преимущества волокнистых почвозаменителей для применения в космической оранжерее, которые заключаются в том, что они не выделяют частиц, способных разлетаться по кабине в невесомости, удобны в обращении и не требуют дополнительных оболочек для сохранения формы и объема при отсутствии силы тяжести. Еще одно преимущество волокнистых почвозаменителей связано с удобством внесения в них удобрений. Очевидно, что ППС почвозаменителей возможно повысить путем добавления в них минеральных удобрений, причем первые такие эксперименты в наземных условиях подтвердили эффективность внесения медленно действующих гранульных удобрений типа «Осмокот» именно в волокнистый ионообменный почвозаменитель (Левинских, 2001).

Таким образом, можно заключить, что проблему минерального питания растений в космических оранжереях для условий микрогравитации в настоящее время целесообразно решать путем

размещения в корневых модулях сменных вкладышей из ионообменных соленасыщенных почвозаменителей, из которых наиболее предпочтительными и перспективными представляются волокнистые материалы.

### 3.2.3.3. Обеспечение увлажнения и аэрации корнеобитаемой среды

Нижний предельный уровень влажности почвы для вегетирующих растений в почвоведении называют влажностью завядания, которому в природном почвенном слое соответствует капиллярно-сорбционный потенциал воды порядка (-1500) Дж/кг, или (-1500) кПа, или (-150) м вод. ст. (Вадюнина и Корчагина, 1973; Судницын, 1979; Воронин, 1986; Растворова, 1983). При влажности завядания в корнеобитаемой зоне влага оказывается недоступной корням растений, продукционный процесс становится невозможен, транспирация растений прекращается. С увеличением влажности (и водного потенциала) от нижнего уровня, соответствующего влажности завядания, вплоть до некоторого верхнего граничного значения интенсивность продукционного процесса растений постепенно увеличивается. Это верхнее граничное значение влажности обусловлено тем, что для обеспечения высокой продуктивности растениям необходимы не только доступность влаги, характеризуемая высокими значениями водного потенциала, но также и достаточная интенсивность аэрации корневой зоны, обеспечивающая подачу кислорода для дыхания корней и отвод с помощью вентиляции газообразных корневых метаболитов. Хорошая аэрация почвы оказывается возможной тогда, когда определенная часть ее пор заполнена воздухом. В природных условиях аэрация почвы обеспечивается за счет пор аэрации, освобождающихся от влаги благодаря гравитационному стоку части поливной воды. Однако слишком интенсивный гравитационный сток поливной воды ведет, с одной стороны, к перерасходу воды и затраченных на полив энерго-ресурсов, а с другой – к выносу полезных элементов минерального питания из верхних слоев почвы. Поэтому рекомендуется проводить расчеты полива, соотнося его с количеством влаги, которое почва способна удержать после полива и последующего свободного стока гравитационной воды (Муромцев, 1981). Эта характеристика влагоемкости почвы, определяющая верхнюю границу достижимых на практике равновесных потенциалов воды в верхних слоях почвы, называется общей (по Н. А. Качинскому) или наименьшей (по А. А. Роде) влагоемкостью почвы, или предельной полевой (по А. П. Розову), или полевой (по С. И. Долгову) влагоемкостью, и может зависеть как от состава почвы, так и глубины грунтовых вод. Учитывая реальное снижение продуктивности растений по мере понижения водного потенциала почвы, в работе (Муромцев, 1981) дана ориентировочная таблица нижних границ оптимального диапазона ВП для различных культур на средне-суглинистых почвах. Данные для ряда культур из работы Муромцева приведены ниже в табл. 3.11. Уровни ВП, вошедшие в таблицу, были получены с помощью тензиометров, которые устанавливали в корнеобитаемом слое почвы, для овощных культур, например, на глубине 5-10 см. При

достижении показаний тензиометра значений ВП, указанных в табл. 3.11, было рекомендовано проводить полив растений. В упомянутой работе рекомендовано также увеличивать граничные величины ВП для почв легкого гранулометрического состава (пески, супески) на 5 кПа, а для тяжелых суглинков – уменьшать на 5 кПа по сравнению с приведенными в табл. 3.11.

Критерием выбора нижней границы допустимого для растений диапазона водных потенциалов при поливе в цитируемой работе было предложено считать либо значимое снижение урожайности, либо снижение относительной транспирации, равной отношению действительной транспирации растений к потенциальной, а также обнаружение признаков стресса у растений. Однако контроль относительной транспирации в реальных условиях вызывает технические затруднения, а признаки стресса проявляются обычно значительно ниже тех ВП, при которых уже заметно снижение продуктивности относительно максимально возможной (Feddes, 1978; Jones и Or, 1998; Westgate, Boyer, 1985). Наиболее точным и удобным критерием оптимальных ВП в корневой зоне можно считать получение максимальной для данных условий культивирования продуктивности растений.

Таблица 3.11

Интервалы нижней границы водного потенциала, при которых рекомендуется начинать полив почвы, в зависимости от выращиваемых культур и от фазы развития растений, по данным работы (Муромцев, 1981)

Культура	Фаза развития	Интервал ВП, (-1)·кПа
1	2	3
Петрушка, салат	От посева до смыкания листового покрова	10÷15
	От смыкания до конца вегетации	15÷30
Морковь, сельдерей	От посева до формирования корнеплода	10÷15
	До конца вегетации	15÷25
Фасоль	От посева до цветения	15÷25
	Цветение – налив бобов	25÷30
	До созревания	30÷40
Овес, пшеница, рожь, ячмень	От посева до кущения	15÷20
	Стеблевание – цветение	20÷25
	Налив зерна – молочная зрелость	25÷30
	Вызревание зерна	30÷40

Известно, что кислород, поглощаемый корнями растений, необходим для дыхания корней, селективного поглощения питательных элементов и других метаболических процессов (Вадюнина и Корчагина, 1973; Суднищын, 1979; Воронин, 1986). Большинство растений способны получать кислород из водного раствора через корневую систему, поскольку корни при нормальных условиях погружены в почвенный раствор или покрыты водной пленкой. С другой стороны, в результате обменных реакций между корневыми клетками и почвенным поглощающим комплексом, осуществляемых при посредстве почвенного раствора, выделяются углекислота и другие метаболиты (органические кислоты, эфиры, сахара и другие органические соединения), которые при избыточной концентрации могут оказывать угнетающее воздействие на растения. Подвод кислорода к корням, а также удаление ряда продуктов метаболизма из корнеобитаемой среды происходит благодаря аэрации, суть которой, таким образом, заключается в газообмене между атмосферным воздухом и газами или летучими веществами, растворенными в почвенной влаге. Поэтому аэрация, наряду с минеральным питанием и адекватным увлажнением корнеобитаемой зоны, является одним из необходимых условий выращивания растений.

Данные о влиянии на растения недостаточной аэрации вследствие переувлажнения в корнеобитаемой зоне растений и связанных с этим эффектов гипоксии и гиперкапнии приведены, например, в работах (Гринева, 1975; Чиркова, 1988; Wiedenroth, Erdmann, 1985). Длительное кислородное голодание корневой системы вызывает торможение поглощения воды и ее передвижения в листья вплоть до потери тургора тканей. При этом усиливается выделительная функция корневой системы: усиливается выделение  $\text{CO}_2$ , спиртов и иногда молочной кислоты. Повышение концентрации  $\text{CO}_2$  в корнеобитаемой зоне дополнительно подавляет дыхание корней. Кроме того, в растениях могут накапливаться аммиак и нитриты, что приводит к их интоксикации. При длительном анаэробнозе происходит деструкция мембран митохондрий и нарушение дыхания корней. В условиях переувлажнения субстрата обнаруживаются изменения в структуре органов и тканей растений. Многие растения (томаты, табак, некоторые злаки) в условиях гипоксии адаптируются за счет развития в корнях аэренхимных тканей, увеличения объема межклетников. У злаков в таких условиях интенсивно развиваются придаточные корни вблизи поверхности почвы, а также боковые побеги. Корни утолщаются и укорачиваются, принимают более темную окраску, листья уменьшаются в размере. Чувствительность различных видов и сортов растений к переувлажнению может колебаться в широких пределах. Например, для риса переход на анаэробный тип обмена начинается при объемной концентрации кислорода в воздушной фазе почвы ниже 10 %, а для пшеницы 10–13 % (Чиркова, 1988). Считается, что минимально допустимая объемная концентрация кислорода в воздухе почвы находится в диапазоне от 1 до 2,5 %. Максимально допустимая объемная концентрация углекислого газа в газовой фазе корнеобитаемой зоны согласно (Беркович и др., 1997) может составить приблизительно 5–6 %.

Воздух из атмосферы в почву проникает как в газовой фазе через свободные от воды поры, называемые порами аэрации, так и в растворенном виде с почвенной влагой. Часть порового пространства, занимаемую порами аэрации, называют порозностью (пористостью) аэрации,  $\epsilon_A$ , которая связана с общей пористостью,  $\epsilon$ , и влажностью,  $W$ , очевидным соотношением:

$$\epsilon_A = \epsilon - W, \quad (3.40)$$

в котором все величины выражены в объемных долях (или объемных процентах) от объема образца почвы. Поскольку максимальная влажность достигается при заполнении всех пор, она равна порозности по величине. Отношение влажности к порозности, или к максимальной влажности, называют относительной влажностью:  $W_{\text{отн}} = W/W_{\text{МАХ}} = W/\epsilon$ . Подставляя его в (3.40), получим:

$$\epsilon_A = \epsilon(1 - W_{\text{отн}}) \quad (3.41)$$

Экспериментальное исследование влияния объема пор аэрации на рост и развитие растений показало, что минимальная допустимая величина  $\epsilon_A$  зависит как от структуры самой почвы, так и от скорости обмена почвенного воздуха, и, как правило, колеблется для разных почв и видов растений в пределах  $10 \div 20\%$  от  $\epsilon$  (Вадюнина и Корчагина, 1986; Воронин, 1986; Jones, Or, 1996, 1996a). В почве аэрация осуществляется за счет конвекции и диффузии газов в газовой фазе через поры аэрации, которые всегда образуются при гравитационном стоке. Кроме того, аэрация происходит через водную фазу, точнее, через водные пленки на поверхности корней в порах аэрации и по водонаполненным порам. Естественная аэрация почвы на полях, как правило, оказывается достаточной для растений, что позволяет за верхнюю границу оптимального диапазона ВП для почвенного слоя, как было отмечено в предыдущем разделе главы, выбирать максимальную величину ВП, устанавливающуюся после стока свободной гравитационной влаги.

Для описания конвективного газопереноса по порам аэрации в ламинарном режиме справедливо следующее уравнение (Вадюнина и Корчагина, 1986; Воронин, 1986):

$$\frac{\partial P_{\Gamma}}{\partial t} = \frac{RTK_{\Gamma}}{M_{\Gamma}} \cdot \frac{\partial^2 P_{\Gamma}}{\partial x^2}, \quad (3.42)$$

где  $P_{\Gamma}$  – давление газа (воздуха);  $t$  – время;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $K_{\Gamma}$  – газопроницаемость пористой среды;  $M_{\Gamma}$  – молекулярный вес воздуха.

Следует отметить, что аэрация конвекцией идет как за счет конвективного переноса воздуха, так и за счет переноса кислорода вместе с конвективными потоками воды. Однако оценки, сделанные в работах (Hillel, 1980) с учетом максимально возможных концентраций растворенного кислорода, показали, что эффект от аэрации почвы за счет конвективных потоков воды существенно уступает эффекту от газообмена по порам аэрации.

Одномерная диффузия веществ в почве, как и в любой пористой среде, описывается, согласно работе (Вадюнина и Корчагина, 1973; Воронин, 1986), уравнением вида:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left( D_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) + J(x, t). \quad (3.43)$$

Здесь  $C$  – концентрация диффундирующего вещества;  $x$  – координата расстояния в направлении переноса;  $J(x, t)$  – функция распределения стоков и источников диффундирующего вещества,  $D_s$  – эмпирический коэффициент стесненной диффузии в почве, отличающийся от величины коэффициента диффузии в свободном пространстве,  $D$ . Отношение  $D_s/D$ , называемое относительной диффузией,  $D_{отн}$ , по экспериментальным данным колеблется в диапазоне 0,6 – 0,8.

Уравнение (3.43) годится для описания переноса вещества как в газе, так и в жидкости, однако коэффициенты диффузии в газовых фазах выше примерно на четыре порядка, чем в жидкости. Так, коэффициент диффузии растворенного кислорода в воде при нормальных условиях равен  $2,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ , а газообразного кислорода в воздухе –  $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ; коэффициент диффузии  $D$  углекислоты в воде составляет  $2,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ , а в воздухе –  $11,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  (Бретшнайдер, 1956; Енохович, 1983). Кроме того, наблюдения показывают, что корни растений имеют тенденцию развиваться вдоль крупных (например, межагрегатных) пор (Воронин, 1986), которые составляют основную часть пор аэрации. Поэтому можно полагать, что диффузия по порам аэрации обеспечивает основной вклад в аэрацию корневой системы в почве. Поскольку корни всегда покрыты водяными пленками и оболочками, через которые осуществляется транспорт кислорода и углекислоты, а диффузия через них на четыре порядка медленнее, чем в воздухе, именно она может лимитировать скорость обменных процессов в корнеобитаемой зоне, особенно в случае интенсивного культивирования посевов на тонких слоях почвы при недостаточной аэрации.

Отмеченная выше общая закономерность роста продуктивности растений с увеличением ВП в корнеобитаемой среде (до определенной верхней границы ВП) получила подтверждение в опытах с выращиванием различных культур в искусственных условиях в корневых модулях ограниченного объема: пшеницы в работах (Berry et al., 1992; Jones, Or 1996), салата, картофеля и помидор в работе (Vula et al., 1992) и др. Однако, как уже отмечалось, использование природной почвы в конвейерных оранжереях на сегодняшний день неприемлемо. А изготавливаемые для этого специальные почвозаменители отличаются от почв своими гидрофизическими характеристиками. В то же время рекомендации по выбору границ диапазона оптимальных ВП, разработанные для полевых условий, зависят от характеристик почв и опираются на существование предельной полевой влагоемкости, которая предполагает существование силы тяжести. Из всего этого следует, что данные рекомендации не подходят не только для условий микрогравитации, но неприемлемы и в наземных условиях при выращивании растений в КМ с искусственными почвозаменителями. Для этого случая требуется пересмотр верхней границы оптимальных ВП с учетом обеспечения необходимой и достаточной аэрации в корнеобитаемой среде.

Для наглядной иллюстрации несходства гидрофизических свойств почв и капиллярно-пористых почвозаменителей сравним их по зависимости капиллярно-сорбционного потенциала воды от влажности. Эту зависимость в отечественной литературе по предложению автора работы (Глобус, 1969) принято называть «основной гидрофизической характеристикой» (ОГХ), а в зарубежной литературе часто называют «кривой водоудержания» (Шейн и Карпачевский, 2003). На рис. 3.16 представлены кривые ОГХ, полученные из данных работы (Подольский, 2000), для некоторых используемых в корневых модулях пористых корнеобитаемых сред, построенные для режима их осушения.

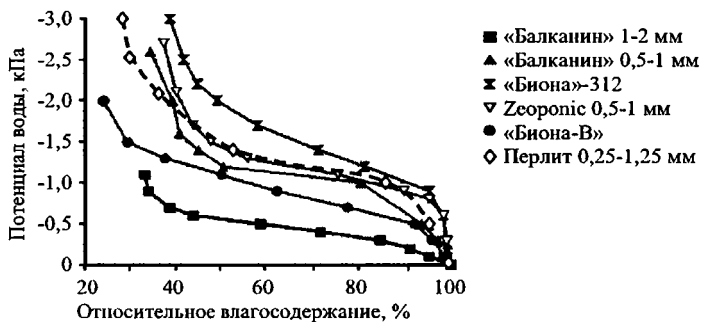


Рис. 3.16. Основные гидрофизические характеристики корнеобитаемых сред, рассчитанные по данным работы (Подольский, 2000)

На рис. 3.17 для сравнения представлены кривые ОГХ для некоторых природных почв в режиме осушения с указанием классификации существующих зон почвенной влаги и функций почвенных пор. На нем также дополнительно для сравнения помещена кривая ОГХ перлита. Заполнение водой тех или иных пор в ПС или почве определяется их размерами и величиной установившегося ВП. Свойства воды в порах зависят от размеров пор, что позволяет определить и классифицировать функции почвенных пор в зависимости от их эффективных размеров (Шейн и др., 1988; Воронин, 1984).

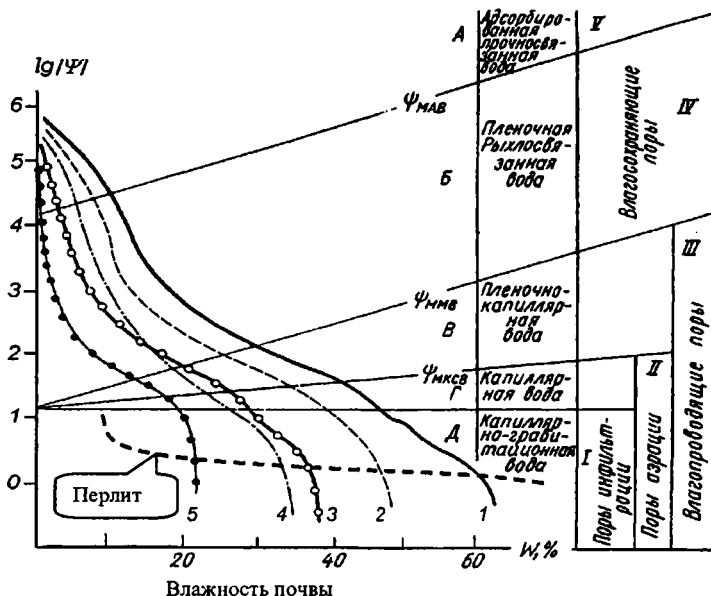


Рис. 3.17. Кривые ОГХ различных почв с классификацией характерных зон почвенной влаги и функций почвенных пор по данным работ (Вадюнина и Корчагина, 1986; Воронин, 1986).  $\Psi$  – потенциал воды, Дж/кг; 1–5 – кривые от более легких почв (крупнопористых) к тяжелым (мелкопористым): 1 и 2 – горизонты  $A_1$  и  $B_1$  чернозема обыкновенного; 3 и 4 – горизонты  $A_1$  и  $A_2$  дерново-подзолистой почвы; 5 – горизонты С каштановой почвы

Следует обратить внимание на наиболее крупные поры в корнеобитаемой среде – поры инфильтрации (зона I), содержащие капиллярно-гравитационную воду или воздух. Диапазон эффективных диаметров этих пор составляет от 20 мкм до единиц мм. Именно в них содержится практически вся доступная растениям влага в почве. Для удобства сравнения на рис. 3.17 нанесена ОГХ перлита, которая, как видно, практически целиком лежит в зоне пор инфильтрации. Из сопоставления кривых на рис. 3.16 и 3.17 можно заключить, что применяемые в космических оранжереях почвозаменители отличаются от естественных почв по структуре гораздо большими размерами пор и более высокой пористостью. Благодаря этому ОГХ у почвозаменителей практически целиком лежат в зоне пор инфильтрации, а доля запасенной влаги в этих порах у них много больше, чем у любой из почв. В этом состоит одно из существенных преимуществ использования почвозаменителей вместо природных почв в корневых модулях космических оранжерей.



## 3.2.3.4. Модели влагопереноса в капиллярно-пористой корнеобитаемой среде

Остановимся теперь более подробно на теоретических моделях движения воды в корнеобитаемой среде в корневых модулях (КМ) космических оранжерей. Vegetация растений сопровождается поглощением воды в объеме КМ разветвленной и развивающейся корневой системой. Соответствующий этому процессу влагоперенос и распределение водного потенциала в корнеобитаемой среде могут быть описаны и оптимизированы с использованием моделей влагопереноса в пористых средах. Для построения таких моделей необходима информация об основных гидрофизических характеристиках почвозаменителя и функции распределения водопотребления (функции распределения стоков воды) корнями растений в объеме КМ (Шейн и др., 1988). Конструкция и геометрические размеры КМ определяют в этих моделях форму линий тока влаги и граничные условия.

Согласно общей теории, движущей силой переноса является градиент полного потенциала переносимой субстанции (Лыков, 1978). Влагоперенос в пористой среде происходит по градиенту так называемого полного потенциала воды, поэтому сначала остановимся на определении этого понятия.

Для описания энергетического состояния воды в почве используют скалярную величину, являющуюся мерой потенциальной энергии, приходящейся на единицу ее массы, а именно полный потенциал почвенной воды,  $P_{\Pi}$ , именуемый для краткости полным водным потенциалом (ПВП). ПВП отличается от термодинамического потенциала Гиббса тем, что дополнительно учитывает потенциальную энергию воды во внешнем силовом гравитационном поле (Воронин, 1986). ПВП принято составлять из трех независимых экспериментально измеряемых водных потенциалов: осмотического,  $P_{\text{ОСМ}}$ , гравитационного,  $P_{\text{Г}}$ , и тензиометрического,  $P_{\text{Т}}$  (Шейн и др., 1988).

$$P_{\Pi} = P_{\text{ОСМ}} + P_{\text{Г}} + P_{\text{Т}}. \quad (3.44)$$

Последний из них – тензиометрический потенциал  $P_{\text{Т}}$  объединяет в себе также три потенциала: пневматический  $P_{\text{А}}$ ; капиллярно-сорбционный  $P_{\text{К}}$  (или матричный  $P_{\text{М}}$ ) и потенциал давления  $P_{\text{Е}}$ :

$$P_{\text{Т}} = P_{\text{А}} + P_{\text{К}} + P_{\text{Е}}. \quad (3.45)$$

В основе этого объединения лежит то, что величина потенциала  $P_{\text{Т}}$  определяется экспериментальным путем с помощью так называемых тензиометров. На практике возможные изменения пневматического давления в корнеобитаемой зоне почвы настолько малы, что составляющей  $P_{\text{А}}$  можно пренебречь. Если еще при увлажнении почвы или используемого в искусственных условиях почвозаменителя механическое давление в ее толще не увеличивается заметно, то также можно пренебречь и составляющей  $P_{\text{Е}}$ . В этом случае, характерном для почвозаменителей в КМ, тензиометрический потенциал сводится к капиллярно-сорбционному, который в дальнейшем будем называть «водным потенциалом» (ВП).

Гравитационный потенциал,  $P_{Гр}$ , измеряется работой по подъему воды против действующей силы тяжести от уровня с нулевым ВП до рассматриваемого уровня. Поэтому он оказывается равным давлению столба воды высотой указанного подъема:  $P_{Гр} = cgh$ , где  $c$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – высота столба. Сумму  $P_T + P_G$  принято называть гидравлическим потенциалом,  $P_G$ :

$$P_G = P_T + P_{Гр} = P_T + cgh \quad (3.46)$$

Расчеты показывают, что величиной осмотического потенциала в выражении (3.44) при концентрациях растворов, используемых обычно для выращивания растений в нормальных условиях, можно пренебречь. Если также можно пренебречь, как было сказано, величинами  $P_E$  и  $P_A$ , то величина ПВП сводится к гидравлическому, равному сумме капиллярно-сорбционного и гравитационного, а в условиях невесомости – к капиллярно-сорбционному потенциалу, что является важным упрощением для практических расчетов. Поскольку водные растворы, используемые в корнеобитаемых средах, практически несжимаемы, то возможен перевод размерности измерения водного потенциала из удельной энергии на единицу массы воды в удельную энергию на единицу объема воды, преобразование который приводит к размерности давления либо напора, то есть высоте водяного столба (если есть сила тяжести). Соответственно, для обозначения составляющих ПВП используют символ давления,  $P$ , или высоты столба воды,  $h$ , что бывает более удобным в практических лабораторных измерениях.

Для каждой капиллярно-пористой среды существует интегральная структурная характеристика в виде статической зависимости ВП,  $P$ , от влажности среды,  $W$ , которую в отечественной литературе по предложению автора работы (Глобус, 1969) принято называть «основной гидрофизической характеристикой» (ОГХ), а в зарубежной литературе часто называют «кривой водоудержания» (Шейн и Карпачевский, 2003). ОГХ для реальных капиллярно-пористых сред обладает гистерезисом из-за несовпадения статических точек в процессе увлажнения и в процессе осушения среды. Основными причинами гистерезиса являются неоднородность формы порового пространства, различие в углах смачивания при заполнении и осушении пор, наличие пор с защемленным воздухом и др. Известны эмпирические уравнения, описывающие ОГХ капиллярно-пористых сред, например, уравнение Ван Генухтена (Van Genuchten, 1995):

$$W(P) = W_{\min} + (W_{\max} - W_{\min}) \left[ \frac{1}{1 + (\xi \cdot P)^n} \right]^{\frac{n-1}{n}} \quad (3.47)$$

Здесь  $W$  – водосодержание или влажность среды;  $W_{\min}$  и  $W_{\max}$  – границы диапазона определения зависимости влажности;  $\xi$ ,  $n$  – эмпирические параметры, каждый из которых зависит от формы пор корнеобитаемой среды, их размеров и углов смачивания поверхности пор при намокании и вытекании воды.

На практике идентификация параметров уравнения (3.47) осуществляется обычно по данным измерений ОГХ для конкретной капиллярной среды. Вода в разных точках корневой среды не обладает одинаковым полным водным потенциалом, что может приводить к появлению неравновесных потоков воды в различных областях корнеобитаемой зоны. Основными причинами градиентов ПВП в корневой среде являются испарение с поверхности, поглощение воды корневой системой в корневом модуле, температурные воздействия, полив, а на Земле еще и постоянно действующая сила тяжести. Согласно общей теории, движущей силой переноса является градиент полного потенциала переносимой субстанции (Лыков, 1978). Для полного описания влагопереноса в ненасыщенной водой пористой среде используют систему уравнений, состоящую из уравнения Дарси и уравнения неразрывности воды, приведенных, например, в работах (Воронин, 1986; Лыков, 1978):

$$\begin{cases} \vec{j} = -K(W) \cdot \text{grad } P_{\Pi}; \\ dW/dt = -\text{div } \vec{j} - J. \end{cases} \quad (3.48)$$

Здесь  $\vec{j}$  – вектор плотности потока;  $W$  – влажность среды;  $K(W)$  – коэффициент влагопроводности в ненасыщенной влагой среде, зависящий от ее влажности;  $P_{\Pi}$  – полный потенциал воды в среде;  $J$  – функция распределения плотности стоков, характеризующая распределение по объему корнеобитаемой зоны поглощения влаги корневой системой и испарения со свободной поверхности менисков в порах;  $t$  – время.

С учетом относительно малых концентраций солей в питательных и почвенных растворах и, соответственно, градиентов их концентраций в корневой среде, а также пренебрежимо малого давления почвозаменителя на стенки корневого модуля, при отсутствии изменений давления в газовой фазе корневой среды можно приближенно считать величину ПВП равной сумме ВП и гидростатического потенциала:

$$P_{\Pi} = P + \rho gh. \quad (3.49)$$

Такая форма представления  $P_{\Pi}$  удобна тем, что она включает в явном виде ускорение силы тяжести  $g$ . Таким образом, модель, построенная с учетом выражения (3.49), также оказывается удобной для описания процессов как в наземных условиях при  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ , так и в невесомости при  $g = 0$ .

Еще одна подстановка, которая необходима для построения модели влагопереноса в корнеобитаемой зоне на основе уравнений (3.48), связана с определением зависимости ВП от влажности пористой среды,  $P(W)$ , в процессе влагопереноса. Само собой напрашивается использовать для этого основную гидрофизическую характеристику (ОГХ) используемого почвозаменителя. Однако правомерность такой подстановки требует обоснования, поскольку формально ОГХ характеризует связь ВП с влажностью почвозаменителя в статическом режиме, т. е. при отсутствии движения воды, а не при влагопереносе. Для обоснования допустимости использования ОГХ сравним кине-

тическую,  $\rho \cdot j^2/2$ , и статическую,  $P$ , составляющие давления в потоке, как это принято в расчетах по гидродинамике (Касаткин, 1971). Правомерность указанной подстановки может считаться оправданной, если выполняется неравенство:  $\rho \cdot j^2/2 \ll |P|$ . Для проверки этого условия были проведены расчеты с использованием зависимости  $j(P)$  по уравнению Дарси при дополнительных допущениях, что в реальных корневых модулях градиенты  $P$  не превышают 10 кПа/дм, при этом обычно выполняется ограничение:  $|P| \geq 1$  кПа. Расчеты подтвердили правомерность подстановки зависимости ОГХ для решения системы (3.48) при принятых допущениях.

Мы проанализировали решения системы уравнений (3.48) применительно к двум типовым вариантам конструкции корневых модулей в космических оранжереях. Первый вариант – КМ в форме прямоугольного параллелепипеда с двойным дном, на котором уложен слой почвозаменителя. При этом верхнее дно, прилегающее к почвозаменителю, представляло собой мелкопористую запорную мембрану, через которую закачивают или откачивают воду или питательный раствор (Беркович и др., 1999, 2000, 2001). Второй вариант – КМ цилиндрической формы с установленной по оси пористой трубкой, подводящей жидкость, поверх которой намотан рулон из нескольких слоев почвозаменителя, выполненного в виде нетканого листового материала и покрытого сверху пластиковым чехлом с прорезями для растений (Berkovich, 2002).

При построении модели КМ с плоским горизонтальным слоем почвозаменителя в наземных условиях удобно было использовать прямоугольную систему координат «X-Y». При этом мы приняли ориентацию оси  $X$  – по горизонтали и  $Y$  – по вертикали, таким образом, чтобы линии тока в слое почвозаменителя были параллельны координатной плоскости  $X$ - $Y$ . При этом считали, что влагоперенос во всех параллельных плоскостях происходит одинаково, так что рассматривали задачу на плоскости. При описании цилиндрического КМ мы считали, что его ось ориентирована горизонтально, и для описания использовали цилиндрическую систему координат, расположенную соосно с КМ, причем так, что радиус-вектор  $r$  лежал в плоскости поперечного сечения КМ, а отсчет угла поворота вектора,  $\varphi$ , отсчитывали от направления вертикально вверх, против вектора силы тяжести. Считали также, что влагоперенос происходит только в радиальных направлениях и одинаков во всех поперечных сечениях КМ, так что задачу свели также к плоскостной. После подстановки  $j$  из первого уравнения системы (3.48) во второе, подстановки водного потенциала из (3.49), а также обозначения  $K(W)$  через  $K(W(P))$ , где  $W(P)$  – ОГХ почвозаменителя, или  $K(P)$ , получаем для плоского слоя корнеобитаемой среды в поле силы тяжести:

$$\frac{dW}{dt} = -K(P) [P_{xx}'' + P_{yy}'' ] - \frac{dK(P)}{dP} \cdot [ (P_x')^2 - \rho g P_x' + (P_y')^2 ] - J(X, Y). \quad (3.50)$$

Для слоя в горизонтальном цилиндрическом КМ в поле силы тяжести аналогичные преобразования в цилиндрических координатах приводят к выражению:

$$\frac{dW}{dt} = -K(P) \left[ P_r' + P_\alpha' + \frac{1}{r^2} P_{\varphi\varphi}' \right] - \frac{dK(P)}{dP} \left[ P_r' (P_r' - \rho g \cdot \cos\varphi) + \frac{1}{r^2} P_\varphi' (P_\varphi' + \rho g r \cdot \sin\varphi) \right] - J(r, \varphi). \quad (3.51)$$

Полученные двухкоординатные уравнения (3.50) и (3.51) подобны по форме «общему уравнению движения воды» (3.52), написанному для одномерного потока, например, в работах (Воронин, 1986; Лыков, 1978). Уравнения пригодны для описания двумерной картины движения воды в капиллярно-пористой среде, в частности в КМ цилиндрической формы.

Сложность решения общего уравнения движения воды послужила поводом для попыток моделирования влагопереноса в ненасыщенных влагой пористых средах на основе аналогий с более простыми и разработанными процессами теплопереноса и молекулярной диффузии (Воронин, 1986; Hillel, 1980). Благодаря таким разработкам влагоперенос в пористой среде в литературе иногда называют капиллярной диффузией и используют понятие коэффициента гидравлической диффузии,  $D(W)$ :

$$D(W) = K(W) \frac{dP_r}{dW}. \quad (3.52)$$

Действительно, после подстановок (3.51) в уравнение движения оно принимает вид:

$$\frac{\partial W(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(W) \frac{\partial W}{\partial x} \right) + J(x). \quad (3.53)$$

Легко видеть, что уравнение (3.53) по форме записи аналогично первому уравнению диффузии Фика, если отбросить функцию  $J(x)$ . Здесь роль коэффициента гидравлической диффузии играет функция от потенциала переноса влаги.

Следует помнить, что понятие капиллярной диффузии может способствовать созданию искаженного представления о физической сущности и об истинном механизме влагопереноса (Воронин, 1986). Механизм движения влаги при ненасыщенной фильтрации сложнее, чем молекулярная диффузия, так как коэффициент  $D$  зависит от  $W$ , то есть меняется в пространстве и по времени, чего нет при молекулярной диффузии. В свою очередь  $W$  является функцией от  $P$ , однако эта зависимость в силу гистерезисных явлений не является однозначной, в отличие от случая молекулярной диффузии. Наконец, движущей силой влагопереноса является градиент полного водного потенциала, а не градиент концентрации влаги, как было бы при полной аналогии с молекулярной диффузией.

В рамках данной работы мы не использовали описанные упрощенные модели влагопереноса при решении задачи моделирования движения воды в капиллярно-пористом почвозаменителе.

3.2.3.5. Определение диапазона оптимальных водных потенциалов в корнеобитаемой зоне

Рассмотрим сначала вопрос о верхней границе оптимальных ВП, обеспечивающих максимальную продуктивность растений в корневых модулях с искусственными заменителями почвы. Предварительно можно уточнить зону возможного местонахождения такой границы по шкале водного потенциала. Проанализируем простейшую модель азрации корнеобитаемой среды в КМ, полученную в работе (Jones, Og, 1998) для гранульного субстрата:

$$C_{\text{отн}} = \frac{C(L)}{C_0} = 1 + \frac{JL^2}{2C_0 D(\epsilon)^{4/3} (1 - W)^{10/3}} \quad (3.54)$$

Эта модель получена решением уравнения (3.44) с подстановкой  $x = L$ , где  $L$  – толщина (или глубина) слоя корнеобитаемой среды, и с учетом взятой из работы (Millington, Quirk, 1959) зависимости величины относительной диффузии газа от объема пор азрации,  $D_{\text{отн}} = D_s/D = \epsilon_A^{10/3} \epsilon^2$ , для гранульной почвы с постоянной во всем объеме влажностью.

Формула (3.54) позволяет оценить относительное изменение концентрации газа, например кислорода, у дна КМ в зависимости от влажности пористой гранульной корнеобитаемой среды или, наоборот, определить влажность, при которой выполняется заданное условие для азрации у дна КМ при условии равномерного поглощения (или выделения) газа по объему КМ, задаваемого постоянной функцией распределения стоков или источников,  $J(x) = \text{const}$ . Поскольку кислород поглощается корнями, то его функция стоков отрицательная ( $J(x) < 0$ ) и, следовательно, второе слагаемое в (3.54) тоже отрицательное. В этом случае относительная концентрация кислорода,  $C_{\text{отн}}$ , у дна КМ с ростом влажности убывает, пока не станет равной нулю. По модели (3.54) в работе (Jones, Og, 1998) были проведены расчеты распределения кислорода в слое толщиной 10 см модельного субстрата из стеклянных шариков с гранулометрическим составом 40 - 194 мкм. Давление пробоя этого субстрата составило 10 кПа. Величина плотности стоков,  $J$ , имитирующая скорость дыхания корней, была взята равной 10 мкг  $O_2$  на 1 мм<sup>3</sup> корнеобитаемой среды в день. Полученные для таких условий характеристики представлены на рис. 3.18, взятом из указанной работы.

Может показаться, что для выбора верхней границы диапазона оптимальных ВП или влажности корнеобитаемой среды в КМ необходимо только экспериментально уточнить минимальную величину  $C_{\text{отн}}$ , при которой азрация может считаться достаточной для выбранных растений, или просто принять требование о допустимости, например, 5- или 10-процентного снижения  $C_{\text{отн}}$  в слое корнеобитаемой среды. В этом последнем случае верхняя граница диапазона оптимальных ВП легла бы в области значений влажности, при которых график  $C_{\text{отн}}(W)$  претерпевает резкий спад, как и рекомендовано в указанной работе. Однако этот вывод представляется ошибочным, т. к. область спада зависимости  $C_{\text{отн}}(W)$  на рис. 3.18 расположена несколько правее указанного значения влажности  $W_b$ , соответствующего критическому давлению пробоя водонасыщенного

субстрата воздухом. При подходе к значению  $W_B$  в процессе увлажнения пористой корнеобитаемой среды величина  $\epsilon_d$  уменьшается, и связь по газовой фазе между наиболее крупными воздухозаполненными порами нарушается. В области  $W > W_B$  в слое субстрата остаются только разрозненные воздухозаполненные поры, часть которых заземлена в толще слоя, а другая часть, находящаяся ближе к поверхности, соединена с атмосферой (Muallem, 1976). Это означает, что при  $W > W_B$  сквозная аэрация всего слоя до дна с помощью диффузионного обмена с атмосферой в газовой фазе через поры аэрации невозможна. Это также означает, что модель (3.54) в наиболее критической для аэрации зоне в окрестности  $W_B$  дает завышенные оценки содержания кислорода и не может быть рекомендована для оценки верхней границы диапазона оптимальных водных потенциалов.

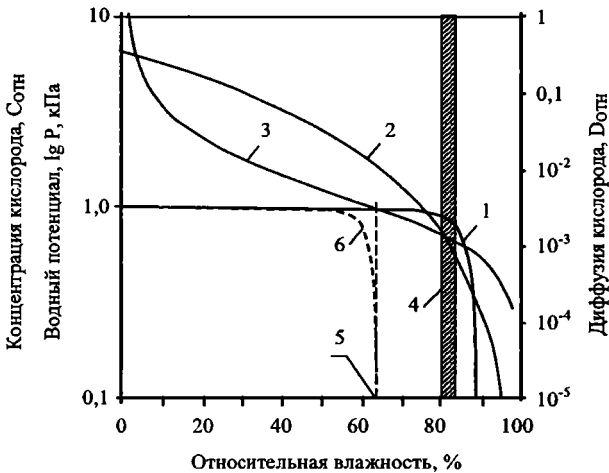


Рис. 3.18. Зависимости характеристик аэрации и водного потенциала от влажности слоя модельного субстрата; по данным работы Jones, Or, (1998). 1 –  $S_{отн}$  – относительное содержание кислорода у дна слоя; 2 –  $D_{отн}$  – относительная диффузия кислорода в слое; 3 – водный потенциал; 4 – зона «оптимальной» влажности; 5 –  $W_B$  – влажность барботирования; 6 –  $C^*_{отн}$  – нормированное относительное содержание кислорода у дна слоя

Указанный недостаток модели (3.54) проистекает, по нашему мнению, из допущений об идеальности структуры пористой корнеобитаемой среды, образованной как бы пучком параллельных капилляров и не учитывающей реальную неоднородность размеров сечений пор, пронизывающих толщу корнеобитаемой среды по всем направлениям. Заметим, что такую модель можно было бы, по-видимому, несколько приблизить к реальной картине с помощью поправочной функ-

ции,  $k(W)$ , нормирующей  $C_{отн}$  так, чтобы при  $W = W_B$  выполнялось условие:  $C^*_{отн}(W_B) = C_{отн}(W_B) \cdot k(W) = 0$ . Однако определение такой функции потребовало бы большого объема дополнительных экспериментальных исследований, требующих сложного в техническом отношении мониторинга концентраций кислорода и других газов на разных глубинах почвозаменителей различных типов.

Другие предлагавшиеся в литературе критерии в виде минимально допустимых концентраций кислорода в воздухе, заполняющем крупные поры почвы, или в виде максимально допустимой концентрации углекислого газа в газовой фазе корнеобитаемой зоны практически непригодны для мониторинга корнеобитаемой среды в корневых модулях в связи со сложностью методов их контроля в КМ, а также из-за недостаточной изученности связи этих концентраций с потерями продуктивности различных растений. Критерий в виде минимальной порозности азрации (Вадюнина и Корчагина, 1973; Воронин, 1986; Bunt, 1988; Jones, Or, 1996) информативен не более, чем давление пробоя, так как не характеризует ни газопроводность корнеобитаемой среды, ни распределение концентрации газов по ее объему. Еще одним недостатком таких косвенных физических критериев качества азрации и увлажнения корней является нестабильность характеристик структуры корнеобитаемой среды, свойства которой могут изменяться по мере развития корневой системы растений (Кривобок, 2004).

Учитывая недостатки описанных критериев, мы предприняли прямую экспериментальную оценку диапазона оптимальных ВП по показателям продуктивности посевов растений. В ходе экспериментов мы исследовали рост и развитие растений, выращенных при различных уровнях ВП в корневой зоне, стабилизированных на протяжении вегетации. За нижний уровень варьирования ВП было выбрано значение -13 кПа, близкое к рекомендованному для полевых условий при выращивании салатных зеленных культур, согласно данным табл. 3.11.

Одним из важных методических вопросов в данных исследованиях являлся выбор корнеобитаемой среды для растений в модельных опытах. Для исключения возможного влияния на рост и развитие опытных растений неадекватных концентраций нутриентов, которые могли бы иметь место в субстратном растворе при использовании ионообменных почвозаменителей в засушливых условиях, в опытах использовали корнеобитаемую среду, не обладающую значительной емкостью анионного и катионного обмена, а именно перлит. Применение гранулированного перлита в комбинации с питательным раствором Чеснокова-Базыриной не только упрощало контроль за составом субстратного раствора, но и позволяло извлекать и отмывать водой корни растений для анализа их характеристик. Толщина слоя перлита в наших опытах была минимизирована для уменьшения гравитационного градиента ВП, снижающего точность определения нижней границы допустимого диапазона водных потенциалов. С другой стороны, толщина слоя не могла быть сделана слишком малой из-за необходимости обеспечения некоторого объема корнеобитаемой зоны, дос-



таточного для выравнивания в нем других параметров корневого снабжения, указанных в разделе 3.2.3, а также для снижения влияния на водораспределение пристеночных эффектов (Yendler, Webbon, 1993). Компромиссная толщина слоя перлита в наших опытах составила около 2 см. Размеры гранул перлита находились в пределах от 0,25 до 1,25 мм. Перед началом опытов были определены основные статические гидрофизические характеристики корнеобитаемой среды: зависимость ВП от объемной влажности (ОГХ); зависимость коэффициента влагопроводности от объемной влажности; зависимость газопроводности от перепада давлений на слое перлита. Указанные зависимости показаны на рис. 3.19–3.21. Приведенные характеристики показывают, что ОГХ перлита имеет узкий гистерезис при изменении режима увлажнения на режим осушения. Влагопроводность этой корневой среды существенно (на 2 порядка) превышает влагопроводность других известных почвозаменителей, указанных на рис. 3.16, в диапазоне ВП от -5 до -20 кПа.

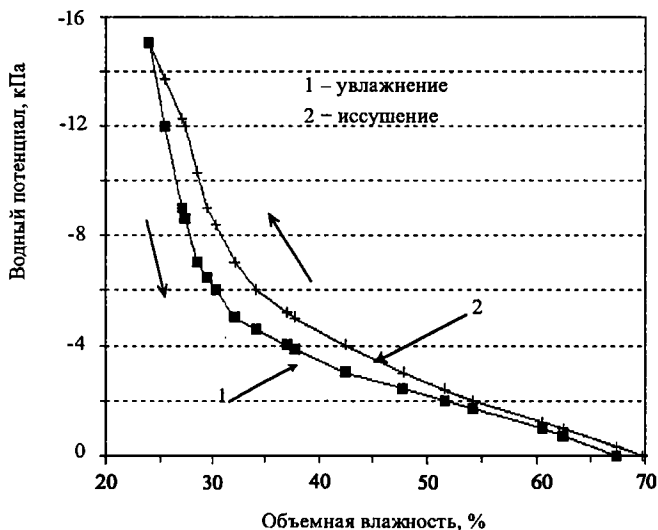


Рис. 3.19. Основная гидрофизическая характеристика перлита

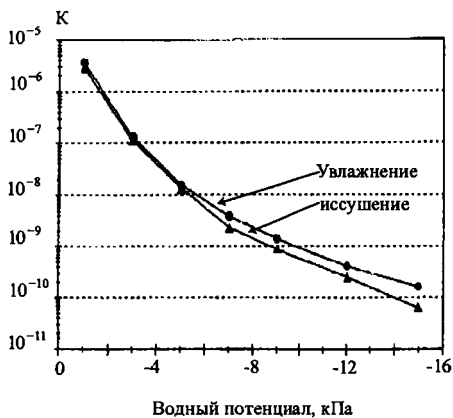


Рис. 3.20. Зависимость коэффициента влагопроводности перлита ( $K$ ,  $\text{см}^3 \cdot \text{с} / \text{г}$ ) от водного потенциала

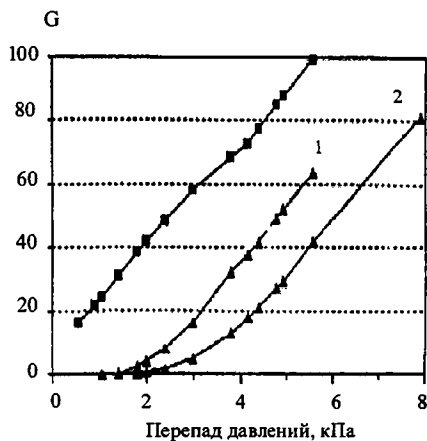


Рис. 3.21. Зависимость коэффициента газопроводности перлита ( $G$ ,  $\text{см}^3 / \text{с}$ ) от перепада давлений.

■ и ▲ – сухой и насыщенный водой перлит; 1 и 2 – при снижении и росте перепада соответственно

Для экспериментального определения границ диапазона оптимальных ВП в корневой зоне мы разработали экспериментальный стенд со специальными корневыми модулями (Беркович и др., 1999), в которых выращивали горчицу и пшеницу в слое перлита толщиной 2–3 см. Схема уст-

ройства стенда и использованных КМ, а также принцип их действия поясняются на рис. 3.22. Корневые модули представляли собой прямоугольные контейнеры 1 длиной, шириной и высотой соответственно: 16, 21 и 6 см, с двойным дном в виде пористой запорной мембраны 4 из металлокерамики – пластины пористой нержавеющей стали или пористого титана толщиной ~0,5 мм. Сверху на запорную мембрану помещался слой перлита 2, поверх которого насыпали мульчирующий слой 3 из гранулированного полиэтилена. К подмембранному пространству в КМ были подсоединены сосуд Мариотта 5 с питательным раствором и сливной шланг 6 с краном. Как известно, с помощью сосуда Мариотта можно поддерживать ВП жидкости на постоянном уровне, соответствующем уровню нижней кромки опущенной в жидкость воздуховодной трубки, независимо от количества воды, налитого выше этого уровня. Перед высаживанием растений сосуд Мариотта 5 поднимали выше КМ, чтобы заполнить раствором подмембранное пространство, а также поры запорной мембраны и перлита. Когда из сливного шланга 6 прекращали выходить пузыри воздуха, кран перекрывали и сосуд Мариотта опускали на запланированную высоту. В статическом состоянии под запорной мембраной 4 устанавливалось разрежение, которое практически было равно величине ВП в уложенном на ней слое перлита 2. Таким образом, величина ВП в КМ определялась давлением водяного столба высотой Н от запорной мембраны 4 до нижнего среза воздуховодной трубки в сосуде Мариотта 5 и легко регулировалась расположением КМ с запорной мембраной относительно сосуда Мариотта. Стенд включал до 12 КМ, в которых можно было поддерживать разрежение питательного раствора под запорной мембраной 4 почти от 0 до -13 кПа. В последнем случае объемная влажность в перлите уменьшалась до 25 %. Гранулометрический состав частиц использованного перлита был выбран в диапазоне 0,25 - 1,25 мм, величина критического давления пробоя слоя перлита воздухом составляла  $1,0 \pm 0,15$  кПа. С учетом возможной неоднородности укладки слоя перлита в КМ за верхнюю границу диапазона варьирования ВП в наших опытах было принято значение -0,5 кПа.

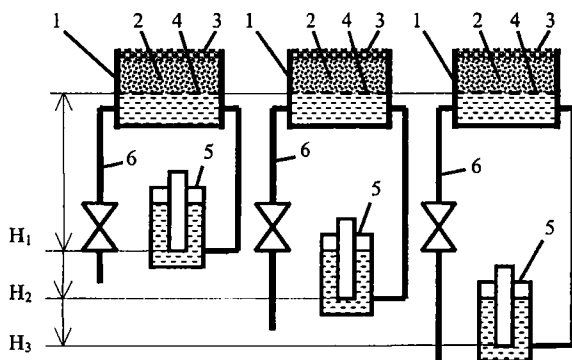


Рис. 3.22. Гидравлическая схема стенда с корневыми модулями. 1 – корпус корневого модуля; 2 – почвозаменитель перлит; 3 – мульчирующий слой из гранулированного полиэтилена; 4 – пористая запорная мембрана; 5 – сосуд Мариотта с питательным раствором; 6 – сливная трубка;  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  – высота столба от мембраны до уровня в сосуде Мариотта

Посадку вели в смоченный перлит наклонувшимися семенами горчицы или пшеницы в количестве 10 или 16 шт. на КМ соответственно. Толщина мульчирующего слоя из полиэтиленовых гранул 3 составляла около 1 см.

В серии исследований были проведены опыты при следующих значениях ВП в корнеобитаемой среде, в кПа:

- в опытах с горчицей -1,0; -9,0 и -13,0.
- в опытах с пшеницей -1,0; -3,0; -4,0; -5,0; -9,0; -13,0.

На диаграммах рис. 3.23 представлены зависимости сырой массы побегов горчицы (рис. 3.20 А) и пшеницы (рис. 3.20 Б) различного возраста от установленного под мембраной корневого модуля водного потенциала в диапазоне от -1 до -13 кПа. Представленные диаграммы показывают практически четырехкратный спад продуктивности обеих культур по сырой массе по мере уменьшения ВП от величины -1 кПа, соответствующей давлению пробоя, до -13 кПа.

У растений горчицы до возраста 15 дней снижение ВП в корнеобитаемой среде оказывало меньшее влияние на продуктивность, чем после 25-го дня. До возраста 15 дней масса растения уменьшалась при понижении ВП вплоть до значения -13,0 кПа. В возрасте от 25 до 40 дней масса побегов резко снижалась при уменьшении ВП до -9,0 кПа, однако дальнейшее уменьшение ВП до -13,0 кПа уже практически не влияло на массу побегов. Масса побегов пшеницы (рис. 3.20 Б) в возрасте 22 и 31 день не отличалась при изменении ВП от -1,0 до -5,0 кПа, и только при -9,0 и

-13,0 кПа было отмечено ее достоверное снижение. На 56-й день вегетации существенное уменьшение морфометрических показателей отмечали при значениях ВП -3,0 кПа и ниже.

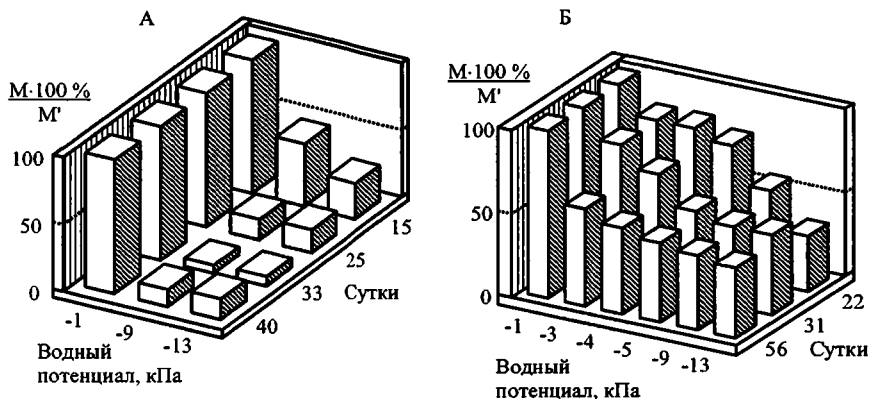


Рис. 3.23. Зависимость отношения сырой массы побегов (М), выращенных при разных водных потенциалах, к сырой массе побегов (М'), выращенных при -1 кПа, для растений горчицы (А) и пшеницы (Б) разного возраста

Понижение ВП в корнеобитаемой среде привело также к уменьшению числа побегов кушения и задержало их появление. У растений, выращиваемых при -1,0 кПа, появление побегов кушения наблюдали уже к 22-му дню вегетации, а 56-дневные растения имели по 2–3 боковых побега. В диапазоне ВП от -3,0 до -5,0 кПа начало развития боковых побегов отмечали лишь к 31-му дню вегетации, а их число в конце эксперимента не превышало 1–2 на растение.

У пшеницы при значениях ВП в корнеобитаемой среде от -0,5 до -2,0 кПа наблюдали формирование продуктивных побегов кушения. Однако боковые побеги отставали в развитии от главного побега на 1–2 этапа органогенеза и отличались более высокой степенью редукции числа цветков в течение генеративного периода. Это оставляет мало надежд на получение заметного вклада боковых побегов в прогнозируемую зерновую урожайность. В то же время доля боковых побегов в сухой массе надземных органов целого растения достигла 52 %, что заметно уменьшило коэффициент хозяйственного использования посева. Оказалось, что при снижении ВП до -3,0 кПа растения пшеницы не дали урожая зерна. Вследствие этого за нижнюю границу диапазона оптимальных ВП для пшеницы было принято значение -2,0 кПа. При этом значении ВП с вероятностью 0,95 еще не наблюдалось статистически достоверного снижения числа цветков в фазе цветения (рис. 3.24) и зерновок в фазе полной спелости зерна в колосе главного побега по сравнению с вариантом посева, выращенным при ВП, равном -1,0 кПа.

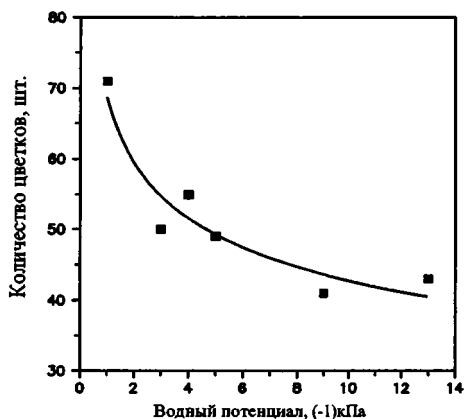


Рис. 3.24. Зависимость количества цветков в колосе главного побега пшеницы в фазе колошения от водного потенциала в почвозаменителе

Для более точной оценки верхней и нижней границ диапазона оптимальных ВП были проведены еще два опыта с растениями горчицы и пшеницы вблизи давления пробоя почвозаменителя, в области ВП от -0,5 до -2,5 кПа. На рис. 3.25 дана диаграмма, иллюстрирующая влияние ВП в корнеобитаемой среде на продукционный процесс у горчицы по результатам этих опытов. На ней видно, что при увеличении ВП в диапазоне от -1,5 до -1,0 кПа величина  $M/M_{MAX}$  остается неизменной, а при увеличении ВП в диапазоне от -1,0 до -0,5 кПа происходит явное снижение величины  $M/M_{MAX}$ , особенно у побегов в возрасте 20 и 25 дней. Этот результат подтверждает высказанные выше соображения о том, что при водосодержании почвозаменителя, соответствующем давлению пробоя, аэрация корнеобитаемой среды в КМ заметно ограничена по сравнению с более низким водосодержанием, однако ее уровень может быть достаточен, чтобы не тормозить продукционный процесс у растений с развитой корневой системой. На основании описанных результатов для растений горчицы за верхнюю границу диапазона оптимальных ВП мы приняли величину -1 кПа, соответствующую давлению пробоя слоя перлита. В отношении нижней границы статистический анализ данных показал, что достоверное снижение массы побегов при 5 %-м уровне значимости наблюдали при значениях ВП ниже -2,0 кПа. Таким образом, нижняя граница диапазона оптимальных ВП для горчицы на перлите составила примерно -2,0 кПа. Этот водный потенциал соответствовал около 51 % объемной влажности перлита.

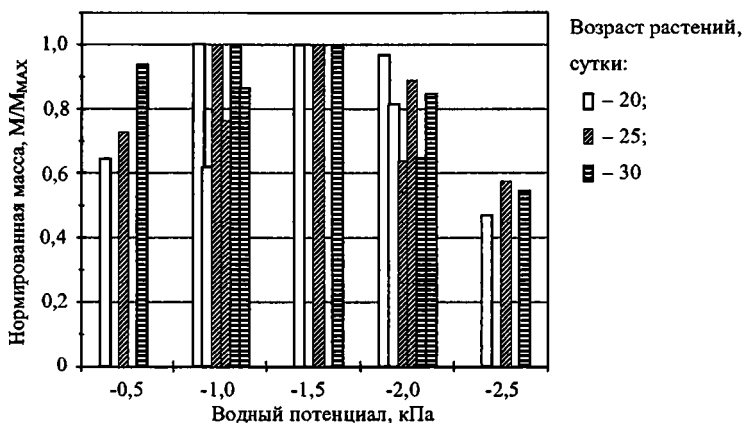


Рис. 3.25. Нормированная масса побегов горчицы при разных значениях водного потенциала в корневой зоне

Аналогичные исследования по определению нижней границы диапазона оптимальных ВП для растений, культивируемых в КМ с различными почвозаменителями из числа применявшихся в космических оранжереях и перечисленных на рис. 3.16, показали, что она слабо (в пределах 15–20 %) зависит от типа почвозаменителя. Например, при культивировании растений на слое почвозаменителя «БИОНА-В3» толщиной 1 см, имеющего давление пробоя  $0,5 \pm 0,1$  кПа, статистически достоверное уменьшение продуктивности наблюдалось при значениях ВП ниже  $-2,5$  кПа. Сходные результаты были получены американскими учеными в работе (Steinberg, Henninger, 1997) при выращивании соевых бобов на гранульном почвозаменителе «Profile™».

В целом, оценки границ диапазона оптимальных водных потенциалов для растений горчицы и пшеницы по результатам различных исследований дали сходные результаты.

Исходя из изложенного, мы сделали вывод, что при проектировании корневых модулей с почвозаменителями, подобными по своим гидрофизическим свойствам перлиту или волокнистому монообменнику «БИОНА-В» (рис. 3.16), за диапазон оптимальных ВП следует принимать интервал от нижнего уровня  $-2,5$  кПа до верхнего уровня, соответствующего давлению пробоя почвозаменителя.

Напомним, что полученная оценка нижней границы диапазона оптимальных ВП в КМ с почвозаменителями оказалась почти на порядок выше, чем принятая в почвоведении для тех же растений в полевых условиях (см. табл. 3.11).

Среди возможных физических причин, вызывающих столь сильное различие диапазонов оптимальных потенциалов при выращивании растений в корневом модуле с почвозаменителями и в естественных полевых условиях, можно назвать существенные различия гидрофизических ха-

рактических почвозаменителей и естественных почв, относительно малый удельный объем корнеобитаемой зоны на одно растение в корневых модулях с образованием корневых матов и неоднородностей свойств по объему. Для более детального выяснения причин необходимы дальнейшие исследования.

Изменения ВП в корневом модуле с пористой трубкой, погруженной в почвозаменитель, наглядно показаны для случая выращивания посева соевых бобов на рис. 3.26, построенном по материалам работы (Steinberg, Henninger, 1997). На рисунке видно, что при поддержании значений ВП внутри пористой трубки в допустимом диапазоне от -0,5 до -1,5 кПа и при отсутствии влагопереноса разница ВП между верхним и нижним слоями почвозаменителя в КМ определяется лишь различием величин гравитационного или капиллярного потенциала и составляет около 1,0 кПа.

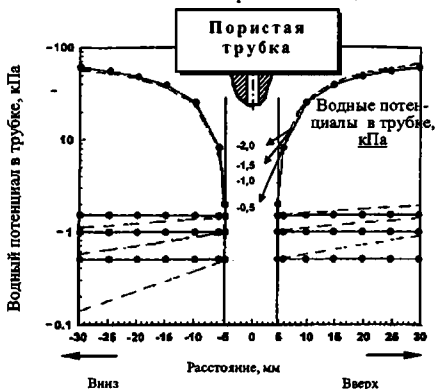


Рис. 3.26. Радиальное распределение водного потенциала в корневом модуле с пористой трубкой, погруженной в почвозаменитель, при выращивании соевых бобов при различных водных потенциалах внутри трубки. • — без учета гравитационного потенциала; — — с учетом гравитационного потенциала

На основании закона Дарси применительно к движению воды из подмембранного объема через слой капиллярно-пористой среды для расхода в интегральной форме можно записать:

$$Q = - DP / (F_p + F_m), \quad (3.55)$$

где  $Q$  — расход воды через мембрану;  $DP$  — суммарная разность полных водных потенциалов между водой в трубке и наружной поверхностью почвозаменителя;  $F_p$  и  $F_m$  — гидравлические сопротивления слоев почвозаменителя вместе с корневой системой растений и мембраны. Учитывая, что на практике гидравлическое сопротивление у мембраны много меньше, чем у слоя почвозаменителя, можно пренебречь вторым слагаемым в знаменателе формулы (3.55). Выразив значения гидравлического сопротивления системы «почвозаменитель-корни» через коэффициент влагопроводности  $K_p$ , после преобразований уравнения (3.55) можно получить:



$$\Delta P = \frac{Q \cdot L_{\Pi}}{K_{\Pi} \cdot S_{\Pi}} \quad (3.56)$$

где  $K_{\Pi}$  – эквивалентный коэффициент влагопроводности системы «почвозаменитель-корни»;  $L_{\Pi}$  – эквивалентная толщина слоя почвозаменителя;  $S_{\Pi}$  – эквивалентная площадь слоя почвозаменителя.

Формула (3.56) показывает, что понижение ВП в корнеобитаемой зоне тем больше, чем толще слой почвозаменителя в КМ и чем меньше эквивалентная площадь поверхности пористой мембраны и влагопроводность корнеобитаемой среды. Примеры гидрофизических характеристик различных КС, показанных нами в работе (Беркович и др., 1997b) и на рис. 3.26, во всех случаях демонстрируют значительное понижение ненасыщенной влагопроводности почвозаменителей при уменьшении ВП в них. В рассматриваемом примере при ВП в пористой трубке, равном -2,0 кПа гидравлическая проводимость корнеобитаемой среды уменьшилась до такого значения, что для сохранения потока воды, достигнутого в посеве сои при исходном уровне ВП в пористой трубке в -0,5 кПа, на слое почвозаменителя потребовался бы почти на 2 порядка больший перепад ВП между пористой трубкой и верхним слоем. Таким образом, вода в большей части объема почвозаменителя, становится энергетически недоступной растениям. Первым показателем водного дефицита в этом случае служит, в свою очередь, снижение транспирации и фотосинтетической продуктивности посева растений.

### 3.2.3.6. Влияние конструктивных особенностей корневых модулей на продуктивность выращиваемых в них растений

В ряде работ по исследованию влияния на рост и развитие растений конструктивных параметров корневых модулей и физических свойств используемых в них материалов, в частности, пористых корнеобитаемых сред (Muallem, 1976; Bunt, 1988; Milks et al., 1989), в наземных экспериментах было показано, что размеры контейнера для выращивания растений или корневого модуля, а также степень уплотнения и механические характеристики субстрата существенно влияют на объем пор азрации и количество доступной растениям воды. В ряде работ (Fonteno et al., 1981; Milks et al., 1989; Van Geduchten, 1980) было также отмечено, что чрезмерное уменьшение размеров КМ может приводить к ограничению роста растений. В то же время проблема обоснования выбора оптимальной формы, размеров и материалов для корневых модулей космических оранжерей в литературе практически не раскрыта.

Рассмотрим более подробно воздействие конструктивных элементов корневых модулей на среду обитания корневой системы растений и их продуктивность. Большинство конструкций корневых модулей, применяемых в настоящее время в космических оранжереях, можно подразделить

на 2 группы, отличающиеся способом подачи воды в корнеобитаемую зону в процессе культивирования растений, а именно:

- 1) путем принудительной дозированной подачи воды по перфорированным или пористым трубкам в КМ с капиллярно-пористым почвозаменителем (космическая оранжерея «Свет»);
- 2) путем подачи воды в КМ (с пористой корнеобитаемой средой или без нее) за счет капиллярных сил через водонасыщенную пористую запорную мембрану (PGBA, ASTROCULTURE™ и др.).

В корневых модулях с принудительным дозированием воды, помимо перфорированных или пористых дренажных трубок, погруженных в корнеобитаемую среду, устанавливают обычно датчики влажности для постоянного контроля влажности корнеобитаемой среды в КМ в процессе вегетации и определения момента подачи очередной дозы воды. При длительном режиме работы в течение нескольких последовательных вегетаций в такой системе могут накапливаться ошибки из-за дрейфа показаний датчиков, из-за нестационарности гидрофизических свойств почвозаменителя в процессе вегетации, а также ряда других причин: изменения плотности и теплопроводности корнеобитаемой среды вследствие развития корневой системы, изменения контактных характеристик датчика и среды при замене отработавшего субстрата и др. (Berkovich et al., 2002).

Конструкции корневых модулей с запорной мембраной из керамики, металлокерамики или пористых пластмасс в форме пластин или трубок, специально разработанные для космических систем увлажнения и азрации корнеобитаемой зоны, описаны, например, в работах (Dreschel et al., 1989, 1994; Koontz et al., 1990; Berkovich et al., 1991; Bula et al., 1992). Среди разработанных конструкций КМ с запорными мембранами следует отметить 2 основные модификации:

- КМ с запорной мембраной в виде трубки или пластины, покрытых внешним мульчирующим покрытием, например, пластиковой пленкой с прорезью для растений. В таких КМ семена для выращивания растений размещают непосредственно на поверхности пористых трубок или пористых пластин;
- КМ с запорной мембраной и примыкающим к ней пористым почвозаменителем, а также внешним мульчирующим покрытием. В таких КМ семена растений высаживают в почвозаменитель.

Экспериментально было обнаружено (Betty et al., 1992), что в КМ с запорной мембраной, но без почвозаменителя существует сильная зависимость продуктивности растений от величины водного потенциала на поверхности мембран, практически совпадающей с подмембранным разрежением. В опытах по выращиванию пшеницы на поверхности керамических пористых трубок, обернутых чехлами из непрозрачной пленки (Dreschel, Sager, 1989; Bohm, 1979), было обнаружено, что при ВП внутри пористой трубки, равном  $-0,8$  кПа полученный урожай уменьшился на 42 % по сравнению с контролем, в котором поддерживали ВП, равный  $-0,4$  кПа. При понижении ВП до  $-3$

кПа зернового урожая практически не было. В корневых модулях с прямым контактом корневой системы и мембран было отмечено, что продуктивность растений при одном и том же ВП в порах мембраны может зависеть и от формы поверхности мембран, например, от диаметра пористых трубок. Для оценки влияния на границы допустимого для растений диапазона водных потенциалов таких конструктивных особенностей КМ, как форма поверхности мембранного элемента и наличие капиллярно-пористого почвозаменителя в корнеобитаемой среде, потребовалось провести специальное экспериментальное исследование.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.27. Объектом исследования являлась мягкая пшеница *Triticum aestivum* L., сорт Super Dwarf. Растения выращивали в корневых модулях пяти различных конструкций с подачей питательного раствора в корнеобитаемую среду через запорные мембраны разной формы с размерами пор 2–6 мкм. Система регулирования ВП и устройство корневых модулей схематически показаны на том же рис. 3.27. КМ 1 и КМ 3 представляли собой пористые керамические трубки диаметром 10 и 22 мм и длиной 25 и 37 см, соответственно. Трубки были снабжены непрозрачными пластиковыми чехлами с отверстиями для растений. КМ 2 и КМ 5 имели вид плоских кювет размерами 21 x 16 x 5 см с двойным дном, верхнее из которых было выполнено из пористого титана. В КМ 5 титановую пластину покрывал слой капиллярно-пористой среды толщиной 2,5 см с размерами гранул от 0,25 мм до 1,25 мм. КМ 4 представлял собой кювету с размерами 26 x 6 x 6 см, заполненную такой же средой на глубину 5 см. В слой перлита до середины его глубины была погружена горизонтально пористая трубка диаметром 10 мм и длиной 25 см. В КМ 2, КМ 4 и КМ 5 посадочную поверхность мульчировали слоем полиэтиленовых гранул толщиной около 1 см.

Питательный раствор поступал внутрь керамических трубок или в пространство между плоской мембраной и дном сосуда с расходом не менее 10 мл в мин. Площадь поверхности мембран на одно растение составляла в КМ 1 около 3 см<sup>2</sup>, в КМ 2 и КМ 3 – около 17 см<sup>2</sup>, при одинаковых расстояниях между растениями. Объем перлита на одно растение в КМ 4 и КМ 5 составлял около 40 см<sup>3</sup>. Растения выращивали в течение 49 дней под люминесцентными лампами белого света при температуре 23 ± 3 С и относительной влажности воздуха 55 ± 5 %, при 16-часовом фотопериоде в сутки. Среднее значение ППФ на уровне верхних листьев изменялось по мере роста растений в варианте КМ 1 в пределах от 200 до 220 мкмоль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> и в остальных вариантах КМ от 200 до 300 мкмоль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Различие было связано с замедленным ростом растений в КМ 1. В качестве питательной смеси использовали раствор Чеснокова, разбавленный до 0,5 от нормы, с микроэлементами по Хогланду. Растения во всех вариантах конструкции КМ выращивали при трех значениях водного потенциала: -0,4, -3,0 и -5,0 кПа, которые обеспечивали объемную влажность перлита 63, 43 и 32 % соответственно.

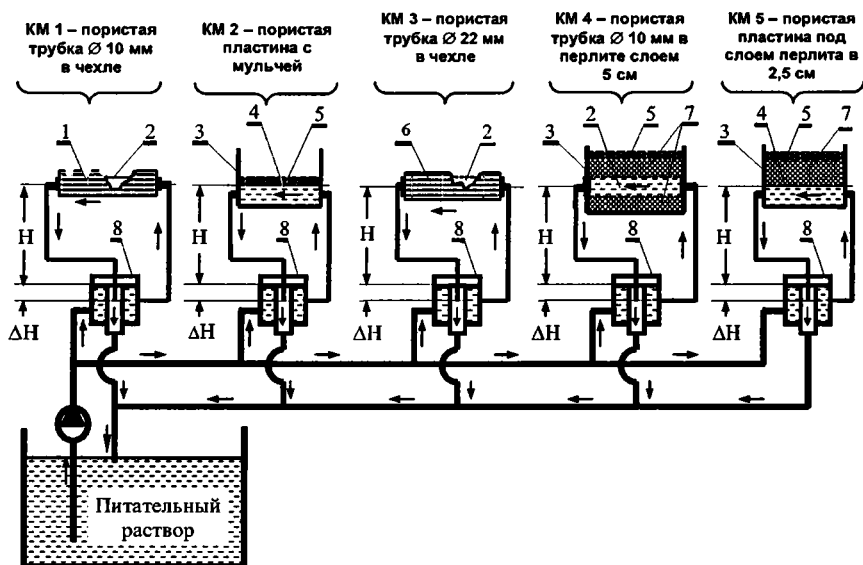


Рис. 3.27. Гидравлическая схема экспериментального стенда с регулированием водного потенциала в различных корневых модулях с пористыми мембранами. 1 – непрозрачный чехол с посадочными отверстиями; 2 – пористая керамическая трубка с размером пор  $2\pm 6$  мкм; 3 – пластиковый корпус; 4 – пористая пластина из титана с размером пор  $2\pm 6$  мкм; 5 – мульчирующий слой  $\sim 1$  см из полиэтиленовой крошки; 6 – непрозрачный чехол с посадочной щелью сверху; 7 – слой перлита; 8 – переливной датчик уровня;

$H$  – разность уровней, определяющая водные потенциалы в опытах;

$\Delta H$  – разность уровней, побуждающая переток раствора

Данные по сухой массе целого растения и отдельных органов, полученные в опыте, представлены на рис. 3.28 А, Б и В. В KM 1 при значении ВП, равном  $-5,0$  кПа, растения погибли еще до окончания эксперимента, поэтому соответствующие этому варианту столбцы отсутствуют на диаграммах. Анализ результатов по остальным вариантам опыта показал, что в KM 4 и KM 5, заполненных перлитом, продуктивность растений оказалась значительно выше по сравнению с вариантами, где растения размещались непосредственно на поверхности пористых мембран (рис. 3.28 А). При ВП, равном  $-0,4$  кПа, сухая масса целого растения в KM 3 была ниже в 1,6 и 1,8 раз по сравнению с растениями, выращенными в KM 4 и KM 5, соответственно. В KM 2 сухая масса растений была ниже в 2,6 и 2,8 раза, а в KM 1 – в 3,7 и 4,0 раза, чем в KM 4 и KM 5, соответственно. Различия по биомассе растений, обусловленные конструкцией KM, по мере снижения ВП несколько сглаживались. Так, при ВП на уровне  $-5,0$  кПа сухая масса растений, полученных в разных KM, различалась всего в  $1,9\pm 0,3$  раза.

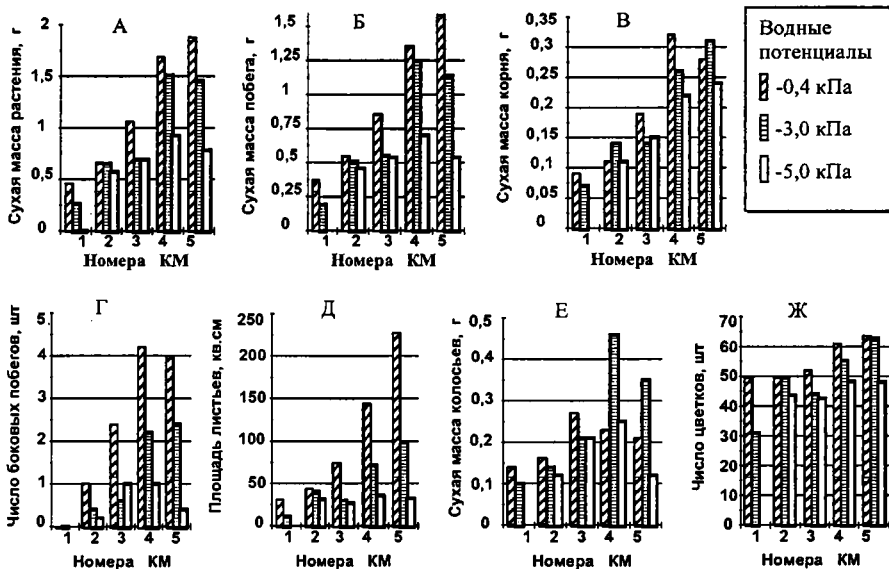


Рис. 3.28. Диаграммы изменения морфометрических показателей растений пшеницы по вариантам опытов при выращивании в корневых модулях пяти разных конструкций (описание в тексте) и при различных водных потенциалах

Среди КМ, в которых растения выращивали непосредственно на поверхности пористых мембран, наибольшую продуктивность обеспечил КМ 3. В этом КМ при уровне ВП, равном -0,4 кПа, было получено сухой биомассы растений в 1,6 раз больше, чем в КМ 2, имеющем такую же удельную площадь поверхности мембраны на одно растение, и в 2,3 раза больше, чем в КМ 1. Различие в продуктивности растений в КМ 2 и КМ 3, возможно, было частично обусловлено разностью в реальных величинах ВП в зоне преимущественного сосредоточения корней, вызванной действием силы тяжести в наземных опытах. На плоской мембране фактическое значение ВП соответствовало заданному, а на трубке в нижней ее части реальный ВП был выше по сравнению с заданным, установленным на уровне оси трубки, на величину водного столба, равного радиусу трубки. Вследствие этого реакция акватропизма корней привела в вариантах КМ с пористыми трубками к преимущественному развитию корневой системы в их нижней части. Однако, согласно работе (Веггу, 1992), даже снижение ВП от -0,4 до -1,4 кПа, т. е. на порядок больше, чем между верхней и нижней точками поверхности пористой трубки, вызывало в КМ 3 уменьшение общей биомассы растений пшеницы не более чем на 42 %. Таким образом, основную причину различия в

продуктивности растений в КМ 2 и КМ 3 следует отнести за счет влияния формы мембран и посадочных устройств в КМ. Более медленный рост растений в КМ 1 по сравнению с КМ 3 был обусловлен, по-видимому, частичным подсыханием относительно крупных семян пшеницы на поверхности трубки с радиусом кривизны, соизмеримым с размером семян. Это могло привести к замедлению поступления питательных веществ из зерновок в проростки на ранних этапах развития.

Уменьшение массы целого растения по вариантам опыта происходило главным образом за счет уменьшения массы побегов, что подтверждают данные на рис. 3.28 Б и В. Соотношение массы корня и побега при уровне ВП, равном  $-0,4$  кПа практически не изменялось во всех типах исследованных КМ. Понижение ВП до  $-5,0$  кПа в большей мере снижало массу побегов, чем корней, что приводило к увеличению доли корня в массе целого растения на фоне снижения общей продуктивности растений. Такое изменение архитектоники растения является характерной реакцией на ухудшение условий в корнеобитаемой среде и свидетельствует о том, что в исследованном диапазоне ВП действуют обычные механизмы адаптации растений.

Анализ роста и развития растений по вариантам опыта показал, что число сформированных боковых побегов является для пшеницы одним из наиболее чувствительных показателей (рис. 3.28 Г). Данный показатель коррелирован с массой побега и особенно тесно с площадью листовой поверхности (рис. 3.28 Д), но не с массой колосьев растения. Масса колосьев в корневом модуле без перлита мало зависела от величины ВП, а в вариантах КМ с перлитом даже возрастала при ВП, уменьшенных с  $-0,4$  до  $-3,0$  кПа (рис. 3.28 Е). Эти данные свидетельствуют о том, что интенсивное образование побегов кушения при повышенной объемной влажности перлита (около 63 %) может привести к существенному увеличению массы вегетативных органов при незначительном изменении зерновой урожайности. Число цветков в колосе главного побега, являющееся важнейшей составляющей потенциальной зерновой урожайности растения, также оказалось стабильным при различных ВП (рис. 3.28 Ж). При ВП на уровне  $-0,4$  кПа растения, выращенные в корневом модуле с перлитом, превосходили по данному показателю растения, выращенные непосредственно на пористых элементах, всего в 1,2–1,6 раза. При понижении ВП различия в числе цветков в колосе главного побега по вариантам опыта практически исчезали. Важным показателем, позволяющим косвенно судить об особенностях условий в корнеобитаемой среде, является структура корневой системы. Согласно полученным данным, при ВП на уровне  $-0,4$  кПа растения, выращенные в КМ 3 и КМ 5, существенно превосходили по общей длине корней растения, выращенные в КМ 1, КМ 2 и КМ 4. Это свидетельствует об интенсивном ветвлении корней в КМ 3 и КМ 5. Понижение водного потенциала в корнеобитаемой среде привело к уменьшению общей длины корневой системы растений в КМ 1, КМ 3 и КМ 5, что указывает на ингибирование процесса ветвления корней в процессе роста.

Конструкция КМ существенно влияла на объемное распределение корней. Так, при выращивании растений непосредственно на пористых трубках (КМ 1 и КМ 3), как уже отмечалось, образовывался корневой мат в основном на нижней части трубок. При выращивании на плоских мембранах корневой мат образовывался непосредственно на всей их поверхности как в варианте без перлита, так и с перлитом. В последнем случае в КМ 5 корневой мат как бы отделял мембрану от перлита, причем в слое перлита корней практически не оказалось. При выращивании растений в КМ 4, снабженном пористой трубкой, погруженной в перлит, корни располагались как на трубке, так и на дне КМ. При этом при ВП, равном  $-0,4$  кПа, корневая система была относительно равномерно распределена по объему перлита, расположенного ниже трубки, а корневой мат на дне сосуда был слабо выраженным. При уровнях ВП, равных  $-3,0$  и  $-5,0$  кПа, большая часть корней образовывала корневой мат на дне КМ, меньшая часть корней располагалась непосредственно на трубке и очень незначительная доля корней находилась в слое перлита между трубкой и придонным корневым матом. Соотношение масс корней, находящихся на дне корневого модуля, на трубке и в перлите, составляло приблизительно 7: 2: 1. Привлекает внимание тот факт, что растения, выращенные в КМ 4, на всех исследованных уровнях ВП отличались относительно малой длиной корневой системы, измеренной методом пересечений, на единицу массы корней. Очевидно, что корневой мат в КМ представляет собой особую капиллярно-пористую среду с гидрофизическими характеристиками, зависящими от диаметров корней, плотности их переплетения и других характеристик корневой системы, нестационарных в онтогенезе растений. Таким образом, по мере развития корневого мата той или иной формы условия влагопереноса и аэрации в корнеобитаемой среде могут изменяться. Вследствие этого можно ожидать, что режимы водоподачи и аэрации, рассчитанные с учетом первоначальных гидрофизических свойств запорной мембраны и почвозаменителя в КМ, могут перестать быть адекватными после какого-то времени вегетации растений. Кроме того, очевидно, что изменения распределения влаги в КМ при отсутствии гравитационных сил должны приводить к иному, чем на Земле, расположению корневой системы. Например, в условиях невесомости в КМ с пористыми трубками можно ожидать осесимметричного распределения корней в КМ. Вследствие этого окончательную отработку режимов увлажнения в КМ, предназначенных для условий микрогравитации, желательно проводить в условиях реального космического полета.

В целом, на основе вегетационных опытов можно сделать следующие выводы относительно влияния компоновки и формы запорной мембраны в КМ на рост растений.

1. Использование пористого почвозаменителя в КМ с запорной мембраной улучшает условия среды обитания корневой системы при оптимальных значениях ВП в подмембранном пространстве и, как следствие, обеспечивает повышение продуктивности растений.

2. Увеличение диаметра трубчатой запорной мембраны в КМ без почвозаменителя приводит к повышению продуктивности растений, выращиваемых при значениях водного потенциала внутри трубки от  $-0,4$  до  $-5,0$  кПа.

3. В условиях действия силы тяжести форма поверхности запорной мембраны, а также наличие пористого почвозаменителя и его толщина в КМ существенно влияют на структуру и объемное распределение корневой системы растений.

Важным конструктивным фактором для КМ является материал, из которого выполнена запорная мембрана. Для надежного выполнения разделительной функции от запорной мембраны требуется высокая гидрофильность, поэтому большинство пластмасс менее подходят для этой цели, чем, например, керамика или металлокерамика из нержавеющей стали, титана и др. Примером гидрофильного поропласта является специально разработанный полимер пенополивинилформаль (ППВФ), или поливинилалкоголь. Для выбора наиболее подходящих материалов для запорной мембраны корневых модулей в опытах сопоставлялись различные варианты пористых материалов. Так, в работе (Jones, Or, 1996) были испытаны 4 типа запорных мембран: три плоские из нержавеющей стали, нейлона и полиэстера с размером пор  $\sim 5$  мкм и одна из нержавеющей стали в виде трубки диаметром 1,27 см с порами  $\sim 0,5$  мкм. Все они использовались вместе с корнеобитаемой средой из кварцевого песка и позволили провести выращивание пшеницы в 40-дневном опыте при ВП  $-0,9$  кПа. В работах (Betty et al., 1992; Bula et al., 1992) аналогично была подтверждена возможность использования запорной мембраны в виде пористых керамических трубок.

При выборе запорной мембраны большое значение имеет нетоксичность материала по отношению к растениям. В работе (Koontz et al., 1990) в опытах по выращиванию салата (сорта RubyConn) без корневой матрицы на тонкой плоской запорной мембране из нержавеющей стали с размером пор  $0,2+0,5$  мкм было установлено, что растения не имели признаков токсикоза элементами Cr, Ni, и Mo от контакта корневой системы со сталью.

Важнейшее значение при выборе запорной мембраны имеет ее влагопроводность. Согласно данным работы (Jones, Or, 1996), в опытах с пшеницей (Yesogo Rojo) было обнаружено, что в случае, когда проводимость мембраны лимитировала поступление воды в корнеобитаемую среду, влажность в ее толще вдоль направления, перпендикулярного к поверхности запорной мембраны, резко уменьшалась, приобретая к тому же циклические изменения, которые следовали за периодами света и темноты. При этом снижалась и влагопроводность корнеобитаемой среды, а все вместе вызывало увеличение толщины корневого мата на запорной мембране, еще больше затрудняя влагоперенос в толщу слоя корнеобитаемой среды. Заметим, что низкая удельная фильтрация запорной мембраны в КМ иногда может быть компенсирована путем увеличения общей ее площади. В работе (Berkovich et al., 2002) показано, что при близких геометрических размерах пористые трубки из ППВФ обладают, по крайней мере, на порядок большей гидравлической проводимости



стью, чем из трубки нержавеющей стали, и на 2 порядка большей, чем из керамики. Это позволяет при необходимости использовать в КМ пористые трубки меньшего диаметра, освобождая таким образом дополнительный полезный объем для почвозаменителя или уменьшая внешний диаметр корневого модуля при одном и том же объеме почвозаменителя.

Проблема дефицита влагопроводности запорной мембраны может проявляться или обостряться в случае длительной ее эксплуатации из-за эффекта кольматирования (засорения) иллыстами частицами (Муромцев, 1981; Муромцев и Братчиков, 1981). Описано, например, кольматирование керамических бактериальных фильтров (диаметр максимальных пор 0,97 мкм, пористость 20 %), через которые пропускали суспензию глины при перепаде давления 80 кПа в течение 1–2 ч. В результате величина фильтрации насыщенного глиной фильтра уменьшилась более чем в 10 раз, а величина давления пробоя увеличилась в 2,5 раза. Можно ожидать, что запорные мембраны с более крупными порами будут подвержены кольматированию в меньшей мере, чем с мелкими. В работе (Berkovich et al., 2002), например, было обнаружено различное снижение гидравлической проводимости пористых трубок из ППВФ в диапазоне от 4 до 50 % после 72-дневной вегетации пшеницы в корневом модуле с почвозаменителем «БИОНА-ВЗ», в зависимости от однонаправленной или реверсивной подачи воды в КМ.

В целом, правильный подбор материалов и конструкции корневых модулей в значительной степени определяет степень совершенства любой космической оранжереи.

### **3.2.3.7. Методические проблемы экспериментального исследования влагопереноса в условиях невесомости и при воздействии силы тяжести**

В 1980-е – 90-е годы при разработках систем увлажнения корневой системы в исследовательских оранжереях для условий космического полета были предприняты попытки выявить особенности истечения воды в капиллярно-пористых корнеобитаемых средах при отсутствии силы тяжести (Ivanova, Kostov, 1986; Podolsky, Mashinsky, 1994; Подольский, 2000). Очевидно, что такие данные необходимы для уточнения параметров режима работы системы увлажнения и аэрации корневой зоны в космических оранжереях. В работе (Лыков, 1978) было показано, что совпадение количественных оценок течения воды по капиллярам в условиях невесомости и в наземном контроле можно ожидать только для достаточно тонких капилляров, которые на порядки меньше диаметров основной массы пор в реальных почвозаменителях. С другой стороны, в приведенных в разделе 3.2.3.4. основных уравнениях влагопереноса в пористой среде имеется член, учитывающий силу тяжести, поэтому интегральные характеристики процессов влагопереноса в пористых почвозаменителях для условий невесомости могут отличаться от таковых для наземных условий. Степень значимости этих различий зависит от конкретных условий. Поэтому для корректного проведения экспериментов важно тщательно оценивать условия влагопереноса, включая существ-

вующие ограничения как в полетном опыте, так и в контроле. К сожалению, это не всегда выполняется при анализе результатов космических экспериментов по влагопереносу. Например, в ряде работ по исследованию процессов влагопереноса в капиллярно-пористых средах в условиях космического полета на орбитальной станции «Мир» (Иванова и др., 1987; Podolsky et al., 1991; Podolsky, Mashinsky, 1994) результаты полетного опыта сравнивали с расчетными данными или с данными наземного контроля без должного анализа влияния силы тяжести в используемых наземных экспериментальных установках. Ниже мы покажем, что это, несомненно, снизило точность и надежность выводов, полученных в этих исследованиях, и сформулируем ряд рекомендаций и критериев для корректного выявления особенностей влагопереноса в космических экспериментах.

В работе (Yendler, Webbon, 1993) была исследована скорость подъема воды при пропитке слоя монодисперсного субстрата высотой 5,1 см, сложенного из стеклянных шариков со средними диаметрами, в мм: 0,46; 0,78; 1,0; 1,5 и 2,0. Пористость субстрата составляла ~40 % при плотности укладки около  $2,5 \text{ г/см}^3$ . Время подъема в мелкодисперсной среде составило 8 мин, а в крупнодисперсной – 30 мин. В работе было проведено сравнение этих результатов с теоретическими расчетами по уравнениям, приведенным, например, в работах (Вадюнина и Корчагина, 1986; Воронин, 1986), скорости подъема воды в моделирующем субстрат круглом капилляре с диаметром, соответствующим эффективному диаметру использованной среды. Сравнение показало, что теоретическая оценка скорости подъема воды превышает экспериментально установленную. С другой стороны, в опытах было замечено непрогнозируемое относительное увеличение скорости подъема при увеличении размера частиц от 1,5 мм и выше. Из указанных различий сделан вывод об ограниченности применения модели круглого капилляра к процессам переноса в гранулированных средах и о необходимости проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, в т. ч. в невесомости. Исследования такого рода были проведены в работе (Иванова и др., 1987), в которой сравнивалась пропитка водой соленасыщенного субстрата «Балканин» разного гранулометрического состава (1–1,5; 1,5–2,5; 2,5–3,25 мм и смесь) на борту космической станции «Салют-7» и в наземном контроле. В результате исследований было отмечено, что в ходе пропитки наблюдаются три составляющие движения фронта воды: 1) быстрое линейное перемещение; 2) нелинейное перемещение фронта; 3) нелинейное и очень медленное перемещение. При этом экспериментально полученные оценки скорости пропитки плохо согласовывались со значениями, рассчитанными по модели субстрата в виде одиночного капилляра, что, по мнению авторов, могло быть вызвано, например, изменением краевого угла смачивания и поверхностного натяжения воды в субстрате вследствие насыщения воды солями в субстрате. Справедливость гипотезы авторов работы (Yendler, Webbon, 1993) об ограниченности применимости модели круглого капилляра подтверждают данные работы (Лыков 1978), свидетельствующие о необходимости учета изменения поверхностного натяжения воды при рассасывании воды в капиллярно-пористой среде в неве-

сомости. В них показано, что уравнение для «одинокого капилляра» или «капиллярного подъема» неточно описывает движение фронта воды по относительно крупным капиллярам (с диаметрами около 1 мм), так как не учитывает ряд эффектов, вызывающих диссипативные потери и ослабление эффективной величины поверхностного натяжения в мениске. В работе (Лыков, 1978) сообщается также о результатах серии экспериментов, проведенных при свободном падении на самолете, по проверке пригодности расчетов движения мениска жидкости в капиллярах разного диаметра по известному уравнению для капиллярного подъема (впитывания) жидкости в невесомости:

$$\frac{\partial^2 l}{\partial t^2} + \frac{1}{l} \left( \frac{\partial l}{\partial t} \right)^2 + \frac{8\mu}{r^2 \rho} \cdot \frac{\partial l}{\partial t} + g \sin \alpha - \frac{2\sigma \sin \theta}{r \rho l} = 0, \quad (3.57)$$

где  $\alpha$  – угол наклона капилляра;  $l$  – длина столбика жидкости;  $t$  – время,  $r$  – радиус капилляра;  $\mu$  – вязкость воды,  $\rho$  – плотность воды;  $\theta$  – краевой угол смачивания поверхности капилляра водой;  $\sigma$  – поверхностное натяжение воды.

Ограничившись членами первого порядка в выражении (3.57), можно получить следующее выражение для скорости подъема мениска,  $w$ :

$$w = \frac{\partial l}{\partial t} = \frac{r^2 \rho}{8\mu} \cdot \left( \frac{2\sigma \sin \theta}{r \rho l} - g \sin \alpha \right). \quad (3.58)$$

Опыты показали, что такое решение для расчета скорости менисков хорошо сходится с экспериментальными результатами для очень узких капилляров (до 0,1 мкм). Очевидно, что для капилляров с такими диаметрами и длиной, сравнимой с размерами корневого модуля (т. е. порядка десятков см), в уравнении можно пренебречь членом, учитывающим гравитацию, поскольку он мал по сравнению членом, включающим капиллярное давление. Отсюда следует, что для узких капилляров выражение (3.58) является универсальным для невесомости и для условий Земли. В то же время для скорости движения менисков это выражение дает завышенную и все более расходящуюся с экспериментальными значениями оценку по мере увеличения диаметра капилляра. Этот эффект убедительно подтвердили эксперименты в невесомости с трубками диаметром до нескольких сантиметров. В дальнейшем в расчетах были учтены потери во входной зоне капилляра, влияние турбулентности, ослабление поверхностного натяжения при неустановившемся течении и инерция жидкости. Было найдено уточненное дифференциальное уравнение и получено его решение для расчета скорости мениска в невесомости, дающее хорошее совпадение с экспериментом:

$$w = \frac{\partial l}{\partial t} = \frac{2\sigma r^2 \cos \theta}{0,2r^2 \sigma \cos \theta + 8\mu l r}. \quad (3.59)$$

В работах (Иванова и др., 1987; Yendler, Webbon, 1993) исследовалась пропитка в средах с относительно большими порами – от нескольких десятых долей мм до нескольких мм (размеры эффективных диаметров пор в гранульных средах имеют тот же порядок, что и размеры частиц). Для этого случая превышение эмпирической скорости фронта воды над ее расчетной величиной могло быть, очевидно, вызвано использованием модели одиночного капилляра, не учитывающей указанных дополнительных эффектов, которые учтены в (3.58). Однако формула (3.58) не учитывает действия силы тяжести, поэтому с ее помощью вряд ли корректно описывать результаты опытов по пропитке относительно крупнопористой среды в наземном контроле. Гипотеза авторов работы (Иванова и др., 1987) о возможном изменении краевого угла смачивания в результате изменения концентрации солей в питательном растворе пока не получила убедительного экспериментального подтверждения. По данным Лыкова (1978) краевой угол смачивания не зависит от силы тяжести, а в работе (Дерягин и др., 1987) было показано, что он не зависит от эффективного размера среди капилляров, в которых может содержаться доступная растениям влага.

В российско-американских экспериментах «Экспериментальная кювета» и «Capillary Test Bed» в рамках программы «Мир-НАСА» сравнивали пропитку гранульных субстратов при импульсной подаче доз воды в условиях невесомости на борту орбитальных станций «Салют-7» и «Мир» и в наземном контроле (Podolsky, Mashinsky, 1994; Подольский и др., 1998; Подольский, 2000; Сычев и др., 2002). В качестве субстратов использовали перлит и «Балканин» с гранулометрическим составом соответственно 1,5–2 мм и 1–2 мм, а также стеклянные шарики с диаметром 1,5 мм и плотностью 2,58 г/см<sup>3</sup>, которые помещали в специальную ячейку прямоугольного или круглого сечения с размерами поперечного сечения от 2,5 до 6 см. Прямоугольная экспериментальная кювета имела несколько подвижных поперечных перегородок, с помощью которых можно было перекрывать движение воды по длине ячейки. Эти перегородки в экспериментах задвигали через некоторое время после начала капиллярной пропитки для предотвращения дальнейшего перераспределения воды по длине ячейки до проведения измерений. В проведенных экспериментах авторами выявлено увеличение скорости и глубины пропитки гранульных субстратов в условиях микрогравитации по сравнению с наземным контролем. Также ими было отмечено разрыхление структуры упакованного слоя субстрата у стенок ячейки на расстоянии, десятикратно превышающем диаметр гранул, что оказало влияние на достоверность результатов. Зона максимальной влажности субстрата в условиях микрогравитации была смещена к средней части ячейки, что по мнению авторов, могло свидетельствовать о неустойчивости фронта распределения воды при микрогравитации (Podolsky, Mashinsky, 1994; Подольский и др., 1998; Подольский, 2000; Сычев и др., 2002).

По нашему мнению, условия проведения полетных и наземных опытов в «Экспериментальной кювете» страдают методическими погрешностями, а анализ полученных результатов не

убедителен, поскольку в опытах изначально не учитывали возможное влияние краевых эффектов в ячейке и влияние силы тяжести в наземном контроле. Для того, чтобы в опытах по исследованию ненасыщенной фильтрации воды через пористую среду были основания пренебречь влиянием силы тяжести, обуславливающим существование отличного от нуля гравитационного потенциала воды в исследуемой среде, необходимо, чтобы величина разности этого потенциала в нижней и верхней точках слоя среды была хотя бы на порядок меньше по модулю минимальной величины капиллярно-сорбционного потенциала воды (см. 3.2.3.4). В наземном контроле минимальное по модулю значение водного потенциала достигается в нижней точке слоя субстрата. Сформулированное условие является, по нашему мнению, одним из критериев корректности прямого сравнения результатов наземных и полетных экспериментов по влагопереносу без введения поправок на действие силы тяжести и краевые эффекты в контроле. Если водный потенциал в объекте (обозначим его как  $P$ ) измерять в см вод. ст., то при разности уровней верхней и нижней точек объекта, равной  $h$  см, это условие корректности может быть записано в виде:

$$|P \text{ [см вод. ст.]}| \geq 10 \cdot h \text{ [см]}. \quad (3.60)$$

Легко показать, что при полном насыщении пористой среды водой, когда потенциал стремится к нулю, этому условию удовлетворяют только очень тонкие горизонтальные слои, в которых трудно избежать краевых эффектов. Для исключения краевых эффектов необходимо вести наблюдения за влагопереносом на удалении хотя бы десяти характерных размеров частиц от ближайшей стенки, как рекомендовано, например, для фильтрационных насадок с зернистыми наполнителями (Касаткин, 1971). Следовательно, чтобы в ячейке прямоугольного сечения для исследования влагопереноса можно было пренебречь краевыми и пристеночными эффектами в гранульном субстрате с характерным размером частиц  $L$ , высота камеры,  $h$ , должна хотя бы в 10 раз превышать толщину двух переходных слоев у верхней и нижней стенок величиной по  $10 \cdot L$  каждый:

$$h \geq 200 \cdot L. \quad (3.61)$$

Это условие является общим критерием корректного выбора высоты сечения плоских исследовательских ячеек при проведении такого рода исследований как в условиях невесомости, так и при действии силы тяжести. Для ячейки круглого сечения радиусом  $R$  соответствующий критерий можно сформулировать из условия, что площадь сечения ячейки должна быть хотя бы в десять раз больше площади пристеночной переходной зоны толщиной в  $10 \cdot L$ , из которого получаем:  $R^2 \geq 10M$  ( $20MRML - 100ML^2$ ). Решение этого неравенства после округления дает критериальное соотношение между радиусом исследовательской ячейки и характерными размерами гранульного субстрата:

$$R \geq 200 \cdot L. \quad (3.62)$$

Подставляя неравенство (3.61) в неравенство (3.60), получаем условие, которое является критерием корректного выбора верхней границы диапазона водных потенциалов при исследованиях влагопереноса в ячейке прямоугольного сечения с минимально допустимой высотой при нулевом заполнителе:

$$|P \text{ (см вод. ст.)}| \geq 2000 \cdot L \text{ (см)}. \quad (3.63)$$

Аналогичные рассуждения по выбору допустимой границы диапазона водных потенциалов для исследований влагопереноса в круглых ячейках с минимально допустимым радиусом приводят к более жесткому требованию, чем для плоских ячеек:

$$|P \text{ (см вод. ст.)}| \geq 4000 \cdot L \text{ (см)}. \quad (3.64)$$

Отметим, что в наземных условиях критерий (3.61) для выбора соотношения между характерными размерами частиц или пор в среде и толщиной ячейки является не единственным, поскольку необходимо также учитывать действие силы тяжести по ограничению возможной высоты капиллярного подъема воды. Высота подъема,  $h$ , воды по капилляру диаметром  $d$  описывается формулой Жюрена (Воронин, 1986):

$$h = \frac{4\sigma \cos \theta}{d(\rho - \rho_0)g}, \quad (3.65)$$

Здесь  $\rho$  и  $\rho_0$  – соответственно плотность воды и воздуха;  $\sigma$  и  $\theta$  – соответственно поверхностное натяжение и краевой угол смачивания воды. Таким образом, зная эффективный диаметр пор среды, можно по формуле (3.65) ориентировочно оценить максимальную толщину слоя, в котором возможно увлажнение капиллярным подъемом воды.

Помимо формулы Жюрена (3.65) для ориентировочной оценки границы размеров пор, способных осуществлять капиллярный подъем воды на Земле, можно воспользоваться известным критерием Бонда,  $Bo$  (Касаткин, 1971), характеризующим соотношение гравитационных и капиллярных сил в общем случае:

$$Bo = \frac{\rho g d^2}{\sigma}. \quad (3.66)$$

Формально равенству этих сил соответствует значение  $Bo = 1$ , при котором расчет эффективного диаметра пор дает величину 2,7 мм. Это означает, что при диаметрах капилляров или эффективных диаметрах пор больше, чем 2,7 мм, капиллярный подъем практически не происходит. Прямой расчет высоты подъема воды по таким порам по формуле Жюрена для хорошо смачивающихся материалов (то есть при  $\theta = 0$ ) дает весьма малую величину: около 5,5 мм.

Оценим теперь порядок размеров частиц, при которых можно корректно проводить исследования влагопереноса в наземных условиях во всех режимах, включая фильтрацию, то есть как в ненасыщенном влагой слое, так и насыщенном за счет капиллярного подъема. Эмпирически высо-

та насыщенного слоя определяется такой характеристикой, как величина давления пробоя (или барбатирувания). Для простоты получения аналитической оценки высоты насыщенного слоя заменим в формуле Жюрена (3.65) диаметр капилляра  $d$  на характерный размер частиц  $L$  и приравняем высоту подъема к высоте водяного столба, равного модулю минимально допустимого ВП из (3.63). Решая такое уравнение относительно  $L$ , получим выражение:

$$L \leq 2 \sqrt{\frac{\sigma \cos \theta}{2000(\rho - \rho_0)g}}. \quad (3.67)$$

Расчет по формуле (3.67) дает максимальное значение  $L$  для хорошо смачиваемых материалов (т. е. при  $\theta = 0$ ):

$$L_{\text{MAX}} = 0,09 \approx 0,1 \text{ [мм]}. \quad (3.68)$$

Это означает, что в наземных условиях, пренебрегая влиянием силы тяжести, корректно проводить исследования по влагопереносу во всех режимах, включая фильтрацию, с такими пористыми средами, характерные размеры пор или частиц которых не превышают порядка 0,1 мм. Понятно, что оценка носит ориентировочный характер и для надежности может быть ужесточена на порядок. Понятно также, что для ненасыщенного влагопереноса требования к размерам  $L$  не столь жесткие. С учетом (3.61) можно добавить, что, в частности, в опытах с насыщением в плоской ячейке со средой, характеризующейся значением  $L \approx 0,1$  мм, можно пренебрегать влиянием пристеночных эффектов при минимальной толщине ячейки  $h = 200 \cdot L = 200 \cdot 0,1 \text{ мм} = 20 \text{ мм}$ .

Для вопросов разработки искусственных почвозаменителей интерес представляет критерий выбора максимального характерного размера частиц или диаметра пор, поскольку с увеличением эффективного диаметра пор среды связано увеличение ее влагопроводности (см., например, Касаткин, 1971). Формально для влагопереноса в условиях невесомости ограничений верхнего размера пор нет. Для наземных же условий это ограничение, как было показано выше, вытекает из соотношения (3.66) и дает величину  $\sim 3$  мм. К этому можно добавить, что, как принято в почвоведении, доступная для растений влага может размещаться в порах почвы или почвозаменителя с эффективными диаметрами больше 20 мкм (Воронин, 1986). Таким образом, для наземных условий эффективные диаметры пор почвозаменителей могут выбираться в диапазоне от 20 мкм до  $\sim 3$  мм.

Возвращаясь к опытам с «Экспериментальной кюветой» и «Capillary Test Bed», легко видеть, что условия (3.61), (3.63) и (3.68) не были удовлетворены даже для слоя самых мелких из использованных гранул размером  $L = 1$  мм. Для корректного проведения экспериментов толщина экспериментальной ячейки должна была составить не менее 20 см, а диапазон значений водного потенциала в исследуемых средах при проведении измерений должен был превышать по модулю 20 кПа (200 см вод. ст.). Следовательно, полученные данные не позволяют напрямую делать выводы о сходстве или различии процессов распространения влаги в исследованных капиллярно-

пористых средах на Земле и в условиях космического полета, поскольку характер движения воды в этих опытах в значительной мере определялся краевыми эффектами, а степень влияния на процесс силы тяжести в наземном контроле не была оценена. Описанные кюветы могут быть рекомендованы для исследования влагопереноса в мелкодисперсных средах с размерами гранул не более 0,1 мм, однако такие среды практически не используют в корневых модулях космических оранжерей из-за трудности их аэрирования. Что касается смещения максимума влажности к средней части ячейки, замеченного в полетных опытах, то этот эффект явился закономерным результатом перераспределения влаги в неоднородной пористой среде до равновесного состояния. Там, где влияние силы тяжести мало, влага всегда оттекает из более рыхлых пристеночных слоев ячейки и концентрируется в средней зоне с более плотной и мелкопористой укладкой частиц. В наземном же контроле этого опыта размеры использованных частиц субстрата и высота ячейки были таковы, что эффект оттока влаги от стенок с более рыхлым слоем подавляется действием силы тяжести. Добавим здесь, что в наземных условиях в капиллярно-пористых средах из достаточно мелких частиц с выраженной монодисперсной структурой (песок, стеклянные шарики) возможно отсутствие перемещения отдельных скоплений воды внутри толщи слоя, подобно капле в горизонтальном капилляре постоянного диаметра (Лыков, 1978).

Еще один космический эксперимент – «Астрокультура-1» – по выявлению особенностей влагопереноса в условиях микрогравитации провели американские исследователи в начале 1990-х годов на борту космического челнока «Колумбия» (Mogrow et al., 1994). В ходе эксперимента был исследован влагоперенос в режиме ненасыщенной фильтрации питательного раствора через арцелит – гранулированную обожженную глину с фракциями частиц 0,85–1,4 мм, помещенный в прямоугольные корневые модули. Перенос влаги в корневом модуле проводили с помощью двух пористых трубок, погруженных в гранульную среду на расстоянии 3 см друг от друга, в которых поддерживали разные значения разрежения по отношению к окружающей газовой среде. Таким образом воду подавали через одну пористую трубку и удаляли через другую. Каждые 12 ч давления в трубках чередовали так, что направление течения менялось на противоположное. Анализ полученных результатов выявил превышение в большинстве случаев скорости переноса воды в условиях микрогравитации по сравнению с наземным контролем. Однако и в этих опытах минимальный размер частиц – 0,85 мм – значительно превосходил максимально допустимый по критерию (3.68) характерный размер, равный 0,1 мм, а габаритные размеры вегетационных сосудов составили 20 x 15 x 15 см<sup>3</sup>, то есть не обеспечили независимости влагораспределения от пристеночных эффектов и фактора силы тяжести.

Таким образом, во всех упомянутых экспериментах по влагопереносу не были соблюдены условия корректности наземного контроля, в частности, не проводилась оценка возможного влияния силы тяжести.



График на рис. 3.29 наглядно иллюстрирует ограничения на выбор основных размеров оборудования при изучении влагопереноса в плоских ячейках с гранульными средами. На оси абсцисс отложены характерные размеры частиц, а на оси ординат – соответствующие им значения минимальной высоты слоя и допустимая граница значений водного потенциала в среде, согласно уравнению (3.63). Параметры экспериментальных ячеек, гранульной среды и значений водного потенциала в ней, соответствующие области точек на прямой  $|P_{MIN}|$  и выше ее, позволяют корректно проводить сравнение влагопереноса в условиях невесомости и при действии силы тяжести. Характеристики влагопереноса в полетных и наземных опытах при показателях, попадающих ниже этой прямой на рисунке, анализировать и сравнивать без учета краевых эффектов некорректно. Таким образом, для корневых модулей с характерными размерами частиц/пор от десятых долей миллиметра и более, при благоприятных для растений величинах водного потенциала от -0,5 до -2,5 кПа, обязательно следует учитывать эффекты, обусловленные действием силы тяжести, при оценке процессов влагопереноса в субстрате.

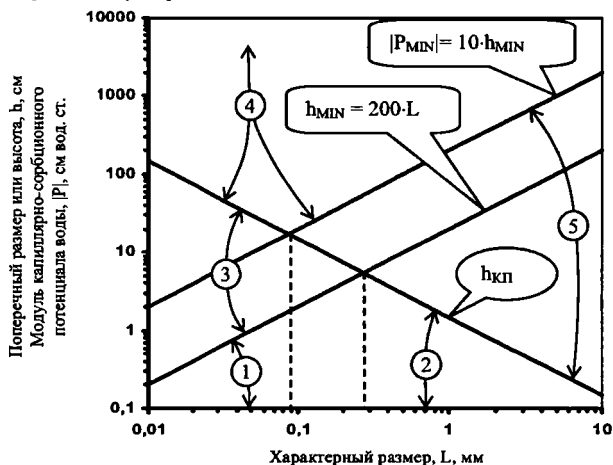


Рис. 3.29. Зоны зависимости гидрофизических процессов в плоской ячейке с пористой средой от факторов: поперечного размера или высоты ячейки, характерных размеров частиц или пор загрузки, и силы тяжести в наземных условиях. 1 – зона поперечных размеров ячейки, при которых заметно влияние краевых эффектов на Земле и в невесомости; 2 – высота капиллярного подъема воды,  $h_{КП}$ , на Земле до состояния затопления пор водой, или толщина слоя затопления на Земле или в невесомости, в котором  $0 < |P| < h_{КП}$ ; 3 – зона поперечных размеров ячейки, в которой влиянием краевых эффектов можно пренебречь и в которой при  $0 < |P| < h_{КП}$  все поры затоплены водой, так что влиянием силы тяжести в наземных условиях можно пренебречь; 4 – зона потенциалов,  $|P|$ , на распределение которых влиянием краевых эффектов и силы тяжести в наземных условиях можно пренебречь в ячейке с поперечным размером,  $h$ , таким, что  $h_{MIN} < h < |P|/10$ ; 5 – зона потенциалов, на распределение которых в ячейке с поперечным размером  $h_{MIN}$  в наземных условиях заметно влияние силы тяжести

В целом можно сделать вывод, что встречающиеся в некоторых работах суждения о существенных изменениях процессов влагопереноса и водораспределения по объему пористых корнеобитаемых сред в условиях микрогравитации по сравнению с наземными условиями не могут быть признаны бесспорными, поскольку в них не были учтены ни факторы силы тяжести, ни пристеночные эффекты.

### 3.2.3.8. Характеристики волокнистого ионообменного заменителя почвы «БИОНА-В3» для космических оранжерей

Для корневого модуля салатной конвейерной космической оранжереи «ВИТАЦИКЛ» был разработан новый волокнистый ионообменный почвозаменитель марки «БИОНА-В3». Как показано в табл. 3.10, волокнистые почвозаменители обладают объемным потенциалом продуктивности, в несколько раз более низким, чем у гранульных ионообменников. Напомним еще раз, что потенциал продуктивности субстрата (ППС) выражается максимальным значением сухой биомассы растений, которую возможно вырастить на дозе субстрата с единичным объемом вплоть до его полного истощения (так называемый объемный ППС) либо на дозе субстрата с единичной массой вплоть до его полного истощения (так называемый весовой ППС). Эксперименты показали, что в вегетационном сосуде емкостью 1 дм<sup>3</sup> с гранульным ионообменным субстратом «БИОНА-312» можно вырастить около 70 г сухой биомассы листовой капусты (Berkovich et al., 2003), а с волокнистым субстратом «БИОНА-В», описанным в работах (Солдатов и др., 1978; Peryshkina et al., 1990) – только 10 г. Расчеты при проектировании оранжереи «Витацикл» с суточной производительностью 150 г/сут при существующих ограничениях на емкость ее корневых модулей показали, что объемный ППС почвозаменителя должен составлять не менее 14 г/дм<sup>3</sup>. Таким образом, субстрат «БИОНА-В» нуждался в существенном увеличении объемного ППС для использования в разрабатываемой оранжерее. Вследствие этого появилась необходимость в разработке нового волокнистого почвозаменителя, названного «БИОНА-В3». Имелись три основные возможности повышения объемного ППС в волокнистых ионообменниках:

- уменьшение доли инертного (прошивного) материала в их составе;
- совершенствование химического состава субстрата;
- увеличение объемной плотности субстрата.

Все эти возможности были использованы для разработки новой модификации волокнистого почвозаменителя «БИОНА-В3». Почвозаменитель был изготовлен по техзаданию ГНЦ РФ – ИМБП в Институте физико-органической химии (ИФОХ) Академии наук Белоруссии под руководством доктора В. В. Матусевича. Исследования характеристик «БИОНА-В3» проводились в ИМБП под руководством д. т. н. Ю. А. Берковича совместно со специалистами из ИФОХ.

Основными материалами для изготовления субстрата послужили волокна сильнокислотно-го катионита ФИБАН К-1 и слабоосновного анионита ФИБАН АК-22-1 российского производства, обладающие высокой обменной емкостью и удовлетворительными сорбционными свойствами по отношению к ионам калия и нитрата. Волокнистый материал ФИБАН АК-22-1 является аминокарбоксильным анионитом, содержащим функциональные группы  $=NH$ ,  $-NH_2$ ,  $-COOH$ . В области значений  $pH < 8$  он ведет себя как слабоосновный анионит. ФИБАН К-1 представляет собой сульфостирольный катионит, содержащий  $-SO_3$  группы. При текстильной обработке волокон в иглопрошивном материале были исключены скрепляющие пропиленовые нити, составляющие, например, у волокнистого почвозаменителя «БИОНА-В» в анионитной ткани 45 %, а у катионитной – 35 % по весу. Благодаря уплотненной упаковке волокон объемная плотность материала была доведена до значений 0,14–0,15 г/см<sup>3</sup> без дополнительного сжатия.

Однако наибольший резерв увеличения ППС имеется в области оптимизации процедуры насыщения ионообменников химическими элементами. Этот факт иллюстрируется зависимостью продуктивности растений листовой капусты (*Brassica pekinensis* (Lour) Rupr), сорт Хибинская, выращенных в ИФОХ на ионообменном субстрате «БИОНА-312» при различном содержании в нем ионов калия, изображенной на рис. 3.30. Максимальный урожай был получен при концентрации калия 0,1 мг-экв на грамм субстрата. При увеличении содержания калия до 0,4 мг-экв/г продуктивность растений падала на 15–20 %, а при дальнейшем увеличении концентрации свыше 1 мг-экв/г растения прекращали рост. При уменьшении концентрации калия ниже оптимального значения продуктивность растений также быстро снижалась. Как известно, основой получения высоких ППС является корректное задание так называемых биозон анионита и катионита по всем основным биогенным ионам. Термин «биозона» впервые был введен академиком АН Беларуси В. С. Солдатовым с сотрудниками в работе (Солдатов и др., 1978) для обозначения областей составов питательных растворов и равновесных им составов ионообменных почв, которые пригодны для нормального роста растений. Похожие области составов питательных растворов, внутри которых рост и продуктивность растений не зависят от состава конкретного раствора, были также очерчены в работе (Steiner, 1980). Биозоны растворов были построены на основании литературных данных о рецептуре питательных растворов для выращивания растений и при введении ряда упрощающих положений, которые позволили представить их в графическом виде в треугольных координатных осях Гиббса. По сути, они дают двумерные сечения объемных биозон по всем питательным элементам, необходимым для развития растений.

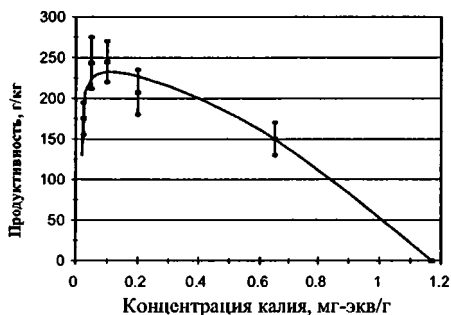


Рис. 3.30. Зависимость урожая пекинской капусты, сорт Хибинская, от содержания калия в ионитном субстрате

Основой для получения биозон ионитов служили катионные и анионные биозоны безаммонийных питательных растворов, построенные по более чем 300 рецептурам питательных растворов. Эти и другие полученные биозоны изображены на рис. 3.31. Можно видеть, что биозоны насыщающих растворов и ионитов существенно различаются. Исходя из данных на рис. 3.30, было рассчитано содержание калия в катионите ФИБАН К-1, а затем выбрана рабочая точка в биозонах анионита и катионита при значении водородного показателя в насыщающем растворе, равном 6,5 ед., и суммарной концентрации раствора 17 мN. Ионный состав полученного почвозаменителя «БИОНА-В3» представлен в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Ионный состав волокнистого субстрата «БИОНА-В3»

Ионы	$K^+$	$Na^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Fe^{3+}$	$NH_4^+$	$NO_3^-$	$H_2PO_4^-$	$SO_4^{2-}$
Содержание, мг-экв на 1 г сухого субстрата	0,16	0,05	0,94	0,33	0,04	0,06	0,40	0,05	0,39

Микроэлементы были введены в состав «БИОНА-В3» по рецептуре, приведенной в работе (Солдатов и др., 1978). Исходя из выбранных таким образом составов ионитов, было проведено насыщение по отдельности штапельных волокон катионита и анионита водными растворами солей биогенных элементов. Затем из насыщенных и высушенных волокон был изготовлен нетканый иглопробивной материал толщиной 1 см, который укладывался или наматывался на пористые трубки в корневые модули в несколько слоев.

В табл. 3.13 представлены некоторые гидрофизические характеристики полученного материала, а на рис. 3.32 изображена зависимость водного потенциала от объемной влажности почвозаменителя, или ОГХ разработанного почвозаменителя.

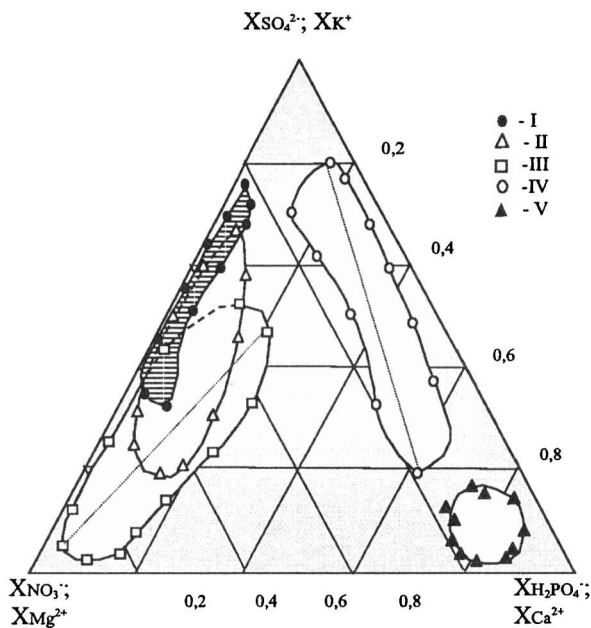


Рис. 3.31. Биозоны питательных растворов и ионообменных смол. Биозоны питательных растворов по анионам (III) и катионам (IV) и соответствующие биозоны анионита ФИБАН АК-22-1 при общей концентрации питательного раствора 0,017N и pH = 6,5 (II) и 5,5 (I) и биозона катионита ФИБАН К-1 при общей концентрации питательного раствора 0,017N и pH = 6,5 (V); X<sub>j</sub> – мольная доля j-го иона в растворе или ионите

Таблица 3.13

Некоторые гидрофизические характеристики почвозаменителя «БИОНА-ВЗ»

Полная влагоемкость, % от объема субстрата	89
Критическое давление пробоя влажного субстрата воздухом, R <sub>кр</sub> , кПа	0,4-0,5
Величина объемной влажности, %, соответствующая давлению пробоя субстрата, Q <sub>кр</sub>	84,5
Газовая пористость, V <sub>кр</sub> , % об., при водном потенциале, равном R <sub>кр</sub>	4,5



Рис. 3.32. Основная гидрофизическая характеристика почвозаменителя «БИОНА-В3»

Сравнение характеристик материала «БИОНА-В3» и известного волокнистого нонитного почвозаменителя «БИОНА-В» показало, что у последнего полная влагоемкость и верхнее критическое значение влажности приблизительно на 12–15 % ниже. Согласно нашим данным для ряда перспективных для космического применения видов растений (пшеница, зеленные культуры) ниже допустимое значение влажности у «БИОНА-В3» почти втрое выше, чем у «БИОНА-В». Таким образом, диапазон допустимых значений влажности для нового ИЗП значительно расширен и составляет более 75 % от полной влагоемкости субстрата. Это дает возможность эффективно вентилировать корнеобитаемую зону растений в условиях невесомости за счет периодического понижения влагосодержания в почвозаменителе. В качестве недостатка, присущего всем почвозаменителям из ионообменных смол, необходимо отметить их сравнительно низкую гидрофильность в сухом состоянии. Высота подъема воды по субстрату «БИОНА-В3» в наземных условиях составляет в этом случае менее 1 см. Одним из возможных путей решения этой проблемы является обработка волокнистого ИЗП неионогенным поверхностноактивным веществом, например моноалкилфениловым эфиром полиэтиленгликоля, что увеличивает высоту подъема воды по субстрату почти до 2 см. Другим методом повышения гидрофильности разработанного ИЗП является его предварительное принудительное смачивание.

Тестовым объектом при биологических испытаниях почвозаменителя «БИОНА-В3» в фитокамере служила листовая капуста, сорт Хибинская. В ходе испытания поддерживали следующие условия среды: температура воздуха дневная  $24 \pm 1$  °С, ночная  $18 \pm 2$  °С, относительная влажность воздуха  $55 \pm 10$  %. Освещение растений осуществлялось дуговыми натриевыми лампами высокого давления со светопериодом 16 ч в сутки, поток фотосинтетически активных фотонов на уровне верхних листьев растений составлял 250–280 мкмоль/(м<sup>2</sup>·с). Влажность субстрата поддерживалась на уровне 70 % от полной гравитационной влагоемкости путем стабилизации уровня в сосуде с водопроводной водой для полива растений. Длительность каждого опыта составляла 30 дней, ко-

личество повторностей – 5. Для оценки ППС опыты проводились с сосудами объемами (в  $\text{дм}^3$ ): 0,07; 0,13; 0,24 и 0,56. Соответствующие значения массы почвозаменителя в сосудах составляли (в г): 10,4, 21,9, 40,4 и 83,5. В каждом сосуде выращивали по 2 растения. Результаты испытаний даны на рис. 3.33 и 3.34. Доверительные интервалы значений веса полученной биомассы вычислялись при 5 % уровне значимости.



Рис. 3.33. Удельный урожай пекинской капусты, сорт Хибинская, в сырой биомассе на 1 кг сухого почвозаменителя "Биона-В3" в зависимости от объема почвозаменителя на одно растение

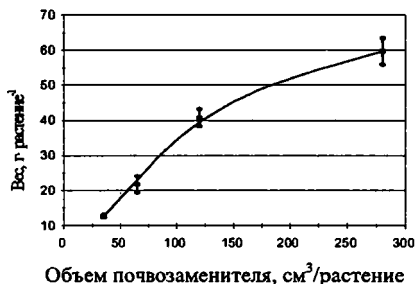


Рис. 3.34. Средний вес 30-дневного растения пекинской капусты, сорт Хибинская, при различных значениях удельного объема почвозаменителя "БИОНА-В3"

Как видно из приведенных на рис. 3.33 данных, 1 кг сухого ионообменного ИЗП «БИОНА-В3» при поливе водопроводной водой способен обеспечить получение за одну вегетацию до 2,4 кг сырой биомассы пекинской капусты, или более 180 г сухой биомассы растений с 1кг сухого субстрата. Значение весового ППС для разработанного субстрата составило 180  $\text{мг}/\text{г}$ , а объемного ППС – 26,9  $\text{мг}/\text{см}^3$ , что примерно в 2,5 раза выше аналогичных показателей известного волокнистого почвозаменителя «БИОНА-В». Кроме того, график на рис. 3.33 показывает, что с уменьшением удельного объема субстрата на одно растение доля ППС, реализованного за одну вегетацию, возрастает практически линейно. Поскольку в условиях космической станции многократная повторная посадка семян растений в использованные субстратные вкладыши вряд ли будет применима из-за оставшейся в них после предыдущей вегетации корневой системы растений, из представленных данных следует целесообразность минимизации объема почвозаменителя. С другой стороны, из рис. 3.34 следует, что средний вес полученных в опытах растений уменьшался при снижении объема корнеобитаемой зоны. При этом наиболее вес растений снижался при уменьшении объема почвозаменителя на одно растение ниже 120  $\text{см}^3$ . На основе полученных оценок приближенно можно считать, что удельный объем «БИОНА-В3» в корневом модуле зеленой оранжереи должен выбираться из расчета около 120  $\text{см}^3$  на растение. Имеются также основания полагать, что достигнутый уровень продуктивности для «БИОНА-В3» не является предельным. Исследования, проведенные в ИФОХ (Матусевич и др., 1997), показали, что биозоны ионообменных

почвозаменителей существенно зависят от концентрации равновесного питательного раствора и его pH. Частично эти данные представлены на рис. 3.31 кривыми I и II. Таким образом, для оптимизации ППС важно не только правильно задать начальный состав компонентов ионообменного субстрата, но и обеспечить его нахождение в приемлемых для растения пределах на протяжении всего периода роста растений. Следует учесть также, что в процессе вегетации неизбежны колебания концентрации и pH питательного раствора, заполняющего поры ионообменного субстрата. Следовательно, для обоснования состава ионообменных субстратов необходимо знать очертания биозон катионита и анионита, соответствующих равновесным питательным растворам с концентрациями солей и значениями pH, варьируемыми в допустимых диапазонах. Такие данные должны быть получены в последующих исследованиях.

В результате описанных исследований был получен новый волокнистый ионитный почвозаменитель, существенно превосходящий по своим физическим и агрохимическим свойствам известные образцы искусственных заменителей почвы. Достигнутый уровень ППС «БИОНА-В3» в 2,5 раза выше, чем у известного ранее волокнистого почвозаменителя «БИОНА-В», что позволило выращивать за одну вегетацию в корневом модуле оранжереи «Фитоцикл» емкостью 1 л до 450 г свежего салата и обеспечить требуемую производительность в салатной оранжерее «Витацикл».

#### 3.2.4. Система регулирования состава газовой среды

Во второй главе книги было показано, что параметры газовой среды в кабине пилотируемого КЛА не всегда могут быть оптимальными для растений в космических оранжереях. Кроме того, растения в оранжерее осуществляют непрерывный газообмен с окружающей средой, изменяя ее состав и даже объем, т. к. ассимиляционный коэффициент (т. е. соотношение объемов поглощаемого углекислого газа и выделяемого кислорода) для посева высших растений, как правило, не равен единице. В частности, для осуществления фотосинтеза необходима подача углекислого газа в воздушную среду растений в определенном диапазоне концентраций и удаление из среды растений выделяемого кислорода. Система регулирования состава газовой среды (СРГС) в космической оранжерее предназначена для поддержания заданного состава газовой среды с учетом структуры посева, назначения оранжереи и выделенных для оранжереи бортовых ресурсов. На рис. 3.35 представлены основные характеристики таких систем. Во многих исследовательских оранжереях (например, BIOMAUS, PGBA, PGU, BPS) воздушную среду практически изолируют от обитаемой кабины КЛА. В этом случае приходится подавать CO<sub>2</sub> из внутреннего источника, но зато нет поступления загрязнителей воздуха из кабины. Для выполнения этих функций вводят в состав СРГС дополнительные устройства: газоанализатор, баллоны с газом, регуляторы давления и т. д. Однако такое усложнение позволяет улучшить воспроизводимость опытов с растениями за счет стандартизации состава газовой среды.



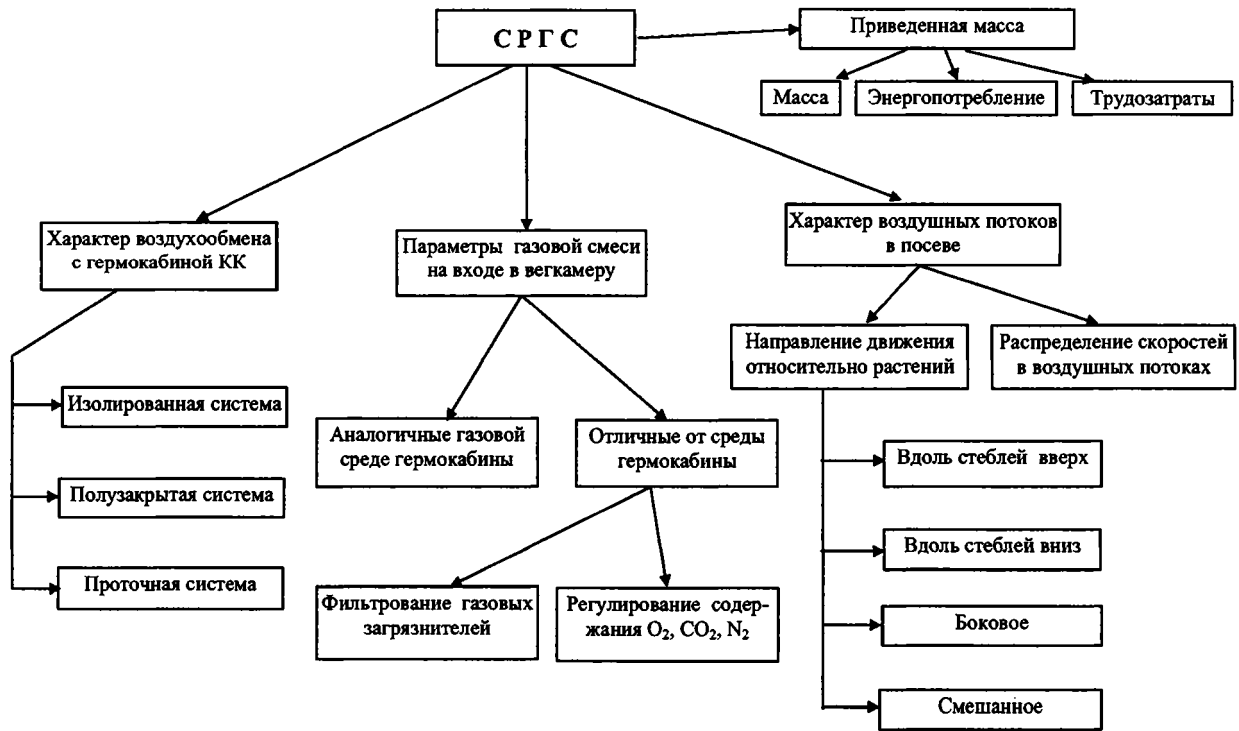


Рис. 3.35. Основные характеристики системы регулирования газового состава (СРГС) космических оранжерей

Для других исследовательских оранжерей в качестве источника углекислого газа используют воздух из кабины, а избыток образовавшегося кислорода сбрасывают туда же. Такой характер воздухообмена, называемый полузакрытым, реализован, например, в салатной конвейерной оранжерее «Витацикл», и он наиболее пригоден для производственных оранжерей, выполняющих дополнительную задачу регенерации атмосферы в БСЖО. Наконец, в том случае, когда воздух из кабины пилотируемого космического корабля продувают через вегетационную камеру с большим расходом, необходимым для удаления из нее тепла от светильников и транспирационной влаги растений, систему регулирования газовой среды в оранжерее называют проточной. Обычно всего несколько процентов от расхода воздуха через вегетационную камеру в проточной системе достаточны для обеспечения углеродного питания растений. Проточная система практически перекладывает нагрузку, связанную с тепловлаговыделением из оранжерей, на систему термовлагорегулирования кабины корабля, что необходимо учитывать при проектировании. Например, в работе (Berkovich et al., 2000a) была рассмотрена работа системы регенерации воды для российского сегмента МКС в том случае, если в ее состав включить в проточном режиме конвейерную салатную оранжерею «Витацикл», потребляющую 1 кВт электрической мощности и выделяющую в кабину, в основном в виде пара, до 10,4 л воды в день. Было показано, что существующие на МКС штатные системы имеют достаточный запас мощности, чтобы регенерировать дополнительное количество воды, поступающей от такой оранжерей. Подобные расчеты необходимо проводить перед проектированием космических оранжерей для любых пилотируемых объектов. СРГС с проточной схемой воздухообмена с кабиной наиболее проста и надежна, что снижает приведенную массу самой оранжерей. Такая схема применена, например, в исследовательских оранжереях «Свет» и «ЛАДА».

В полузакрытых и проточных СРГС при наличии соответствующих ресурсов по энергопотреблению и массе обычно устанавливают различные фильтры газовых загрязнителей на входе в вегетационную камеру, а иногда корректируют и газовый состав в ней, например, снижают концентрацию  $O_2$  и/или  $N_2$  (Corey et al., 1996). Наиболее актуальна, по данным работ (Левинских и др., 1999; Klassen et al., 1999), проблема фильтрации этилена ( $C_2H_2$ ) из воздуха обитаемой гермокабины. В настоящее время наиболее употребительная технология снижения концентрации этилена на входе в вегетационную камеру – фотокаталитическая (Peterson et al., 1994). Воздух пропускают через патрон с тонкой пленкой из окиси титана с примесью окиси циркония, служащую катализатором, облучая одновременно ультрафиолетовыми лучами в диапазоне длин волн от 300 до 400 нм. Такой фильтр эффективен для удаления ненасыщенных или циклических углеводородов и позволяет окислять их до воды и  $CO_2$ . В космических оранжереях BPS и Advanced ASTROCULTURE™ подобный фильтр снижал концентрацию этилена от уровня 40–70 частей на миллиард, обнаруженного в газовой среде МКС, до 20–40 ppb (Zhou et al., 2002; Mortow et al.,

2004). В целом, полузакрытая схема воздухообмена дает наиболее широкие возможности для регулирования состава газовой среды в производственных космических оранжереях.

СРСГС можно классифицировать также по способу организации воздушных потоков в вегетационной камере и по распределению их скоростей, существенно влияющих на рост растений. Как было отмечено в главе 2, скорость воздушных потоков в зоне размещения растений, как правило, не должна превышать значение 0,5 м/с. Выбор направления потоков воздуха зависит от компоновки оранжереи и структуры посева в ней. В производственных оранжереях значительного объема организация равномерного распределения воздушных потоков в посевах является довольно сложной задачей, а воздухораспределители могут существенно увеличивать массу оборудования. Как и для других систем космических оранжерей, одним из основных критериев оптимизации СРСГС при проектировании является минимум приведенной массы.

### 3.2.5. Система термовлагорегулирования газовой среды

Основные характеристики систем термовлагорегулирования в космических оранжереях (СТВР) показаны на рис. 3.36. Физиологические процессы в растениях протекают, как известно, с потреблением внешней энергии, причем суммарный энергетический КПД посева растений, как было отмечено в главе 1, составляет обычно не более 10 %. В главе 1 мы отмечали также, что максимальный КПД систем освещения на искусственных источниках света для космических оранжерей сегодня составляет около 3 %. Следовательно, почти вся энергия, потребляемая КО, рассеивается в виде тепла или испаряемой или транспирируемой листьями растений влаги. Задачей СТВР является регулирование температуры и влажности воздуха в вегетационной камере в допустимых для выращиваемых растений диапазонах значений. По характеру тепловлагообмена с гермокабиной КЛА системы можно подразделить на тепловлагоизолированные, влагоизолированные и с тепло- и влаговыделением в кабину. Первые обычно соответствуют изолированным СРСГС, а последние – проточным. Однако изолированные СРСГС не всегда исключают тепловыделение оранжереи в гермокабину от системы освещения и различных исполнительных механизмов. Может быть построена и СТВР без влаговыделения в кабину (с осушением воздуха внутренним кондиционером до равного влагосодержания с кабинным воздухом), но с тепловыделением. Большинство существующих космических оранжерей не имеют полной изоляции по теплу и влаге. Таким образом, они представляют собой некоторую нагрузку для СТВР кабины. Во избежание местного перегрева или переувлажнения в зоне культивирования растений необходимо минимизировать тепловыделение в рамках выделенных для оранжереи бортовых ресурсов. Среди таких ресурсов в некоторых оранжереях (например, в КОКОР «Витацикл») используется жидкий хладагент из системы охлаждения КЛА, а в других (например, в оранжерее «Свет») в качестве хладагента выступает воздух из кабины.

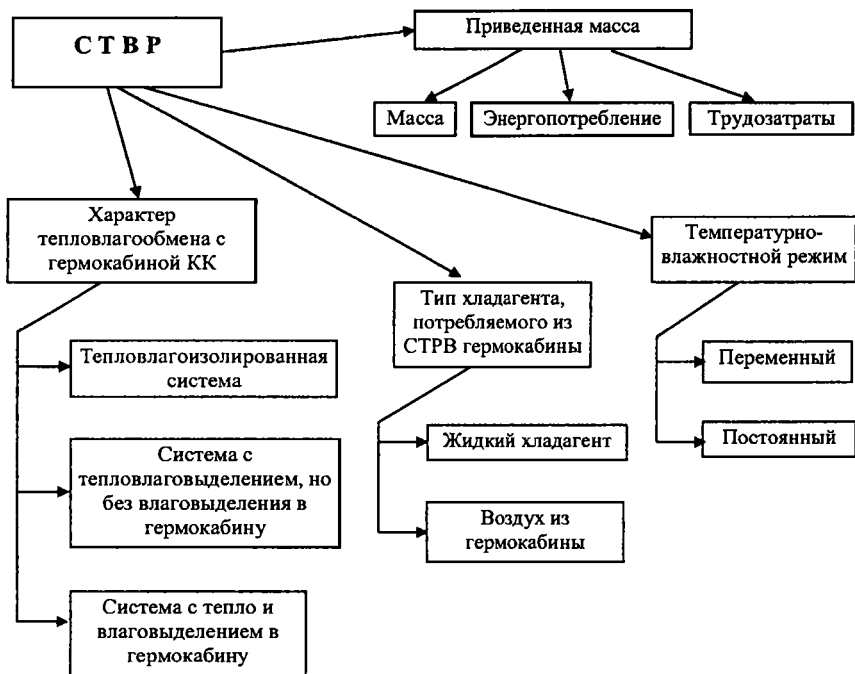


Рис. 3.36. Основные характеристики системы термовлагорегулирования (СТВР) космических оранжерей

Важной характеристикой является временная программа поддерживаемого с помощью СТВР тепловлажного режима. В главе 2 были приведены данные о том, что оптимальные температурные режимы выращивания растений различного возраста бывают неодинаковыми и, кроме того, оптимальные дневные и ночные температуры для многих культур также обычно существенно различаются. В зависимости от назначения оранжереи СТВР может быть рассчитана либо на режим стабилизации температуры и влажности в вегетационной камере без предъявления особых требований к характеристикам переходных процессов, либо на отработку более сложных алгоритмов регулирования, как, например, в системах с автоматической оптимизацией параметров среды обитания растений. В последнем случае в системе необходимо закладывать исполнительные элементы повышенной мощности для обеспечения достаточно быстрых переходных процессов по температуре или влажности в вегетационной камере (Беркович, 1981; Беркович и др., 1977). Выбору конкретных элементов, осуществляющих теплообмен в системах кондиционирования воздуха в космических оранжереях, посвящены многие работы (Iverson et al., 2003, 2004;

Zhou et al., 2002; Kliss et al., 1998; Crabb et al., 1998; Hoehn et al., 1997; Horner et al., 1997; Heathcote et al., 1996; Piastuch et al., 1995).

Известно, что системы регулирования температуры и относительной влажности воздуха в некотором объеме являются взаимосвязанными, поскольку относительная влажность воздуха зависит от температуры. Это вызывает некоторые трудности при реализации СТВР в оранжереях с чисто воздушной системой охлаждения, где имеется лишь один исполнительный механизм – вентилятор (как, например, в оранжерее «Свет»). Более просто реализовать СТВР при введении второго исполнительного механизма, например, теплообменника с хладагентом для охлаждения воздуха, как это было сделано в КОКОР «Витацикл».

Для термовлагорегулирования в оранжереях с небольшими объемами вегетационных камер был разработан так называемый метод контроля точки росы, хорошо зарекомендовавший себя в условиях микрогравитации в исследовательских космических оранжереях PGBA, CPBF и PRU. Суть его состоит в регулировании температуры воды, содержащейся внутри пористых втулок, наружная поверхность которых контактирует с потоком воздуха из ростовой камеры оранжереи. Внутри пористых втулок поддерживают небольшой отрицательный водный потенциал с помощью сильфонной или мембранной емкости и т. д. Если температуру наружной поверхности втулок поддерживают выше точки росы в обдуваемом воздухе, то вода начинает испаряться через поры втулок, повышая влажность воздуха. Если же поверхность втулок будет иметь температуру ниже точки росы воздуха, то пар из воздуха начинает конденсироваться и отсасываться через поры во внутренний объем пористых наконечников (Hoehn, Scovazzo, 2003; Scarascia-Mugnozza, Schettini, 2002). Подобная система была разработана в Висконсинском центре космической автоматики и робототехники (WCSAR) в 1990-е годы и получила название ASTROPOR™. Упрощенная схема системы изображена на рис. 3.37, взятом из работы (Horner et al., 1997). Для регулирования температуры воды в этой системе используют набор термоэлектрических элементов (ТЭ), одна сторона которых размещена внутри вегетационной камеры, другая снаружи. Наружная сторона ТЭ оборудована жидкостным теплообменником для снятия тепла, отводимого из вегетационной камеры. Внутренняя сторона ТЭ оборудована либо радиаторами для теплообмена непосредственно с потоком воздуха, либо жидкостным теплообменным контуром. Каналы жидкостного контура внутреннего теплообменника проходят внутри стенок вегетационной камеры оранжереи и осуществляют их охлаждение.

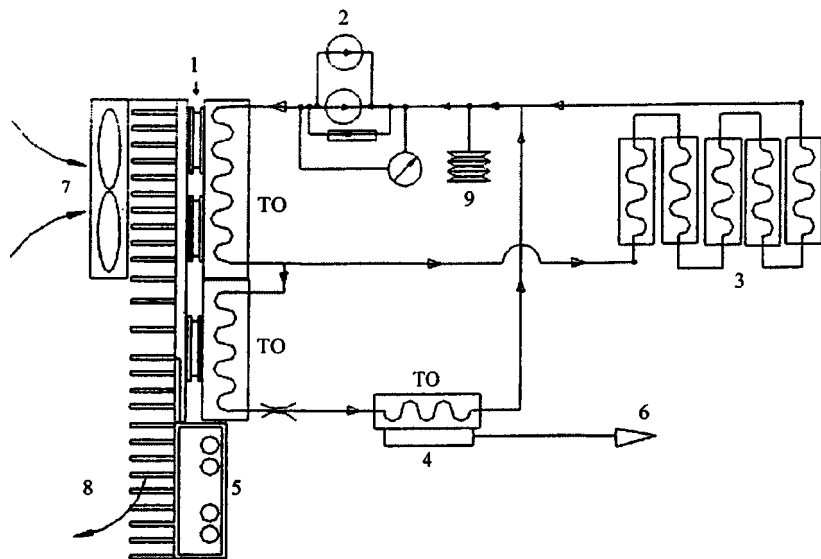


Рис. 3.37. Система термовлагорегулирования атмосферы в вегетационной камере. 1 – термоэлектрические элементы; 2 – водяной насос; 3 – охлаждающие контуры в стенках ВК; 4 – пористая пластина осушителя; 5 – блок освещения; 6 – отвод конденсата воды; 7 – входные вентиляторы; 8 – выход контура воздушного охлаждения; 9 – сифон; ТО – теплообменники жидкостные

При изменении направления тока, текущего через ТЭ, направление теплотрансфера также изменяется на обратное. Использование этого свойства позволило в системе ASTROPOR для вегетационной установки ASTROCULTURE использовать для подогрева и охлаждения ВК один и тот же комплект ТЭ (Duffie et al., 1995). Для такого совмещения функций нагрева и охлаждения в одном исполнительном элементе необходимо тщательное согласование тепловых характеристик внутреннего и внешнего теплообменных контуров. В СКТВ вегетационной установки Plant Generic Bioprocessing Apparatus (PGBA) для нагрева вегетационной камеры была использована отдельная система из нескольких омических электронагревателей (Homer et al., 1997).

Для регулирования влажности воздуха в вегетационных камерах ряда современных космических оранжерей применяется аналогичная система с водонасыщенными капиллярно-пористыми пластинами. Первоначально пластины тщательно пропитываются водой так, чтобы все капилляры были заполнены, после чего воду в капиллярах держат при небольшом отрицательном давлении. Поверхности пластин, обращенные внутрь вегетационной камеры, обеспечивают контакт капиллярной влаги с обдувающим ее потоком воздуха. Температура поверхностей пластин регулируется

при помощи ТЭ. Если температура пластины выше точки росы обтекающего ее воздуха, идет испарение с поверхности пор и увлажнение воздуха в ВК. При понижении температуры пластины ниже точки росы происходит конденсация пара на поверхности пластины и тем самым осушение воздуха. Сконденсированная вода отводится через капилляры пластины в резервуар.

Управление системами нагрева и охлаждения, а также увлажнения и осушения воздуха в ВК осуществляется компьютером вегетационной установки. На основе сигналов, поступающих от нескольких десятков датчиков температуры, влажности, давления, уровня освещения, компьютер осуществляет включение/выключение исполнительных механизмов СКТВ.

Описанные системы продемонстрировали высокую работоспособность. В упомянутой выше установке РГВА поддерживался постоянный режим температуры и влажности воздуха. Во время испытаний системы в космосе значения температуры изменялись в пределах от 24,6 до 25,9 °С при заданном значении 25 °С. Значения относительной влажности воздуха находились в пределах от 76,9 до 80,3 % при заданной влажности 78 % (Hogner et al., 1997).

Система термовлагорегулирования установки ВРS поддерживала переменный термовлажностный режим. При испытаниях системы в космосе задаваемые значения температуры находились в пределах от 20 до 28 °С, а влажности в диапазоне от 65 до 85 %. Анализ отклонений реальных значений температуры и влажности от задаваемых показал, что СКТВ поддерживает заданную температуру с точностью  $\pm 1$  °С, а влажность с точностью  $\pm 10$  % (Iverson et al., 2004).

Окончательную структуру СТВР формируют с учетом критерия минимума приведенной массы. Элементы методики расчета основных параметров СТВР для КО можно найти, например, в работах (Рождественский и Клешнин, 1980; Hicklenton, Heins, 1997; Пеклов, 1967) и др.

### 3.2.6. Система контроля и управления

В числе основных особенностей процесса жизнеобеспечения растений в искусственных условиях можно назвать необходимость непрерывного и надежного контроля среды обитания. Действительно, даже краткосрочные, в десятки минут, нештатные отклонения таких параметров среды, как влажность в корнеобитаемой зоне, температура и влажность воздуха, концентрация газов в вегетационной камере, вызывает резкое снижение урожая или гибель растений, зачастую имеющих длительность вегетации в несколько месяцев. Другой особенностью является высокая трудоемкость агротехнических операций. Например, согласно работе (Silverstone, Nelson, 1996), в течение 2-годичного эксперимента в описанной нами в главе 1 установке «Биосфера-2» работа в биоме интенсивной агрокультуры, включая устранение в нем отказов автоматики, управляющей параметрами среды, занимала около 45 % рабочего времени экипажа. Этот пример показывает, что в космических оранжереях, особенно в производственных, должны предъявляться весьма высокие

требования к оптимизации параметров среды растений и к уровню и надежности автоматизации управления. Основные функции СКУ представлены на рис. 3.38.

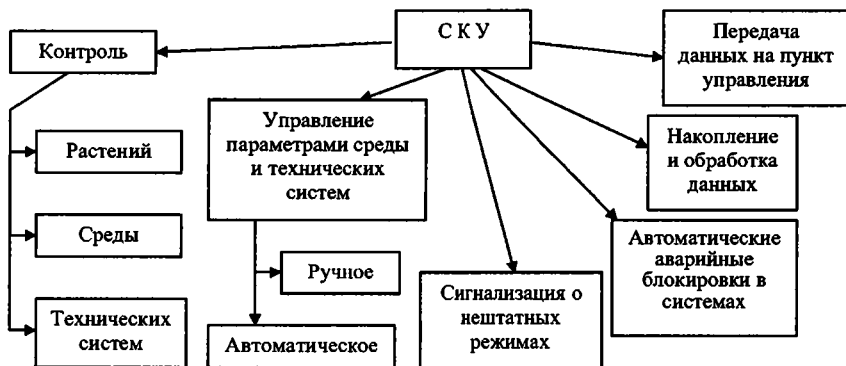


Рис. 3.38. Основные функции системы контроля и управления (СКУ) космических оранжерей

Одним из главных направлений повышения продуктивности сельскохозяйственных растений является оптимальное управление параметрами среды. Подбор наилучших режимов выращивания урожая, особенно в условиях защищенного грунта и светокультуры, представляет собой важнейшую задачу растениеводства. Для организации оптимального управления параметрами среды фотосинтезирующих растений в оранжереях, во-первых, требуется информация о влиянии факторов среды на производственный процесс, обычно в форме некоторой количественной модели. Если такая модель включает величины, зависящие от времени, возраста растений или от фазы их развития, то она называется динамической. Во-вторых, необходимы четко сформулированные критерии оптимальности технологического режима для оранжереи в конкретной программе работы пилотируемого космического корабля или планетной базы. Эти критерии должны носить количественный характер и поддаваться измерению и/или вычислению. В начале данной главы мы перечислили примеры таких критериев для космических оранжерей. Третьим необходимым элементом оптимального управления является алгоритм оптимизации, зависящий в основном от вида функции или функционала показателя оптимальности режима в зависимости от параметров среды в вегетационной камере оранжереи.

В главе 2 мы проиллюстрировали, что производственный процесс в посевах растений, в частности фотосинтез и морфогенез, зависят от большого числа внешних и внутренних факторов. Как правило, в литературе по технологии культивирования растений рекомендуются весьма широкие интервалы допустимых значений одного или двух параметров среды при фиксированных значени-



ях других параметров для всего периода вегетации. Известные математические модели продукционного процесса содержат иногда десятки коэффициентов и параметров и требуют огромной предварительной эмпирической информации (Charles-Edwards, 1981; Сиротенко, 1981; Курец и Попов, 1991 и др.). Некоторые из этих факторов в настоящее время не поддаются автоматическому и не повреждающему растения измерению. Точность текущих прогнозов продукционных характеристик и физиологического состояния растений с помощью таких моделей дает обычно ошибки в десятки процентов. Вследствие вышесказанного определение оптимальных программ изменения различных параметров среды является сложной задачей. Обычно технологические программы для каждой конкретной культуры определяются на основе предварительных опытов и интуиции экспериментаторов, причем степень приближения полученных режимов к оптимальным остается неизвестной. В настоящее время во всех космических оранжереях используются именно такие режимы культивирования растений из-за малочисленности и неточности имеющихся экспериментальных данных о связи условий выращивания с показателями роста и развития различных видов растений в космическом полете.

Неполнота математического описания и наличие существенного дрейфа характеристик посева растений как объекта оптимизации (Корбут и др., 1976) дают основание считать, что в будущем для управления условиями выращивания растений в производственных космических оранжереях эффективными могут оказаться адаптивные системы автоматической оптимизации (САО), использующие текущую информацию о продукционном процессе растений (Беркович и др., 1979; Корбут, 1981). В таких системах процесс непрерывного отслеживания в пространстве регулируемых параметров среды движущегося экстремума функционала качества режима роста растений, зависящего от их возраста, осуществляется так называемыми автоматическими экстремальными регуляторами (Гачинский и др., 1991). Если обозначить через  $F(X, t)$  унимодальную зависимость фотосинтетического показателя продуктивности растений от вектора параметров среды  $X$  и времени  $t$ , то математическую постановку задачи можно записать в следующем виде:

найти функцию  $X^*(t)$ , такую, чтобы для любого  $t$  выполнялось условие

$$\begin{aligned} F(X^*, t) &= \max F(X, t); \\ X &\in D. \end{aligned} \quad (3.69)$$

Здесь  $D$  – область допустимых для растений параметров среды.

В реальном случае эта задача решается лишь приближенно, например, путем минимизации функционала следующего вида:

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [F(X, t) - F(X^*, t)]^2 dt, \quad (3.70)$$

где  $(t_2 - t_1)$  – период, за который оценивается точность оптимизации.

Для поиска экстремума используют различные адаптивные алгоритмы: с запоминанием экстремума, градиентный, симплексный и т. д. Как показали наши исследования (Беркович, 1981), при оптимизации дрейфующего показателя качества апостериорная информация, полученная с помощью наблюдения за функционалом (в данном случае с помощью измерений фотосинтетических показателей посева), всегда является искаженной из-за помех и дрейфа объекта. В процессе оптимизации любого из объектов приходилось оценивать, нужно ли использовать алгоритмы с накоплением и усреднением текущей информации, что замедляет сходимость алгоритма, но увеличивает помехоустойчивость процесса поиска экстремума, или выгоднее применить быстроходящиеся алгоритмы с неточной текущей информацией (Тиме, 1981). Качество выбранных для посева конкретной структуры поисковых алгоритмов оптимизации можно оценивать, например, величиной потерь на поиск и рысканье вокруг оптимальной траектории экстремума. Обычно параметры алгоритмов корректируются по мере накопления информации о реальных характеристиках посева растений в конкретной оранжерее. Возможный метод построения упрощенной математической модели фотосинтеза, пригодной для целей оперативного управления средой растений по данным, получаемым с выхода адаптивной системы оптимизации, был разработан и описан в статье (Верховский и др., 1984). Описанные методы было предложено использовать для оптимизации факторов среды при выращивании растений в наземных теплицах (Норкин и др., 1979). Внутри теплицы в этом случае предлагали разместить небольшой пилотный фитотрон с посевом той же структуры, что и в теплице. Датчики параметров среды и показателей посева в пилотном фитотроне в такой системе подключают к поисковому экстремальному оптимизатору параметров среды обитания, параллельно с которым должен быть включен компьютер с математической моделью объекта управления. Датчики оптимизируемых параметров среды и показателей роста растений, размещенные в фитотроне, должны подавать сигналы на компьютер, моделирующий поведение посева растений на прогнозируемый период. С учетом априорной и текущей информации в компьютере можно периодически идентифицировать значения модели продукционного процесса и вычислять критерий оптимальности для посева на прогнозируемый период. Используя вычисленный критерий, поисковый оптимизатор может находить его максимум и подстраивать параметры среды в фитотроне до найденных значений, а также передать эту информацию в качестве обратной связи на компьютер для очередного уточнения параметров модели. После масштабирования с учетом разницы размеров фитотрона и теплицы компьютер должен подавать управляющие сигналы на регуляторы параметров среды в теплице. Подобные системы контроля и управления будут довольно сложны и, по нашему мнению, смогут найти применение лишь в производственных космических оранжереях в составе БТСЖО будущих планетарных баз, особенно при использовании для освещения изменяющегося потока естественного света.

Для проверки возможностей метода динамической адаптивной оптимизации в определении наилучших режимов культивирования растений в конце 70-х годов в Институте медико-биологических проблем МЗ СССР была впервые разработана и построена трехмерная дискретная система оптимизации фотосинтетической продуктивности растений. На рис. 3.39 изображена блок-схема экспериментальной установки, снабженной системой адаптивной оптимизации фотосинтеза посева пшеницы.

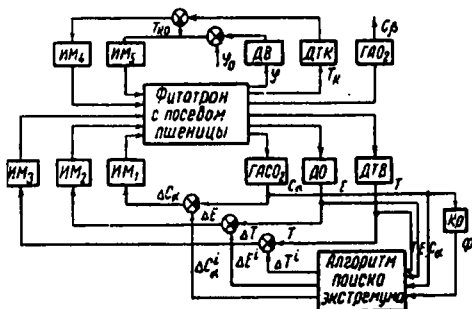


Рис. 3.39. Блок-схема экспериментальной установки для адаптивной оптимизации фотосинтеза посева пшеницы. ГАО<sub>2</sub> – газоанализатор на кислород; ГАСО<sub>2</sub> – газоанализатор на углекислый газ; ДТК – датчик температуры в корневой зоне; ДО – датчик облученности; ДВ – датчик влажности; ДТВ – датчик температуры воздуха; ИМ<sub>1</sub> – ИМ<sub>5</sub> – исполнительные механизмы соответствующих контуров регулирования;  $i$  – номер шага;  $T_{ко}$  и  $\phi_0$  – стабилизируемые значения температуры в корневой зоне и влажности воздуха в фитотроне, соответственно; КР – блок вычисления критерия оптимальности

В качестве критерия оптимальности был использован максимум видимого фотосинтеза  $F$ , однако система могла работать и с критерием в виде максимума коэффициента использования энергии ФАР на фотосинтез либо максимума других функций от видимого фотосинтеза и параметров среды растений. Параметрами оптимизации служили облученность растений ( $I$ ), температура воздуха ( $T$ ) и объемная концентрация углекислого газа в воздухе ( $C_0$ ). В фитотроне стабилизировали следующие условия среды:

- объемную концентрацию кислорода в воздухе в пределах 20,5 - 21,5 %;
- температуру питательного раствора в корневой зоне от 17 до 18 °С,
- относительную влажность воздуха на уровне  $(70 \pm 10)$  %.

В экспериментах использовали субиригационную систему выращивания растений с периодическим затоплением корней питательным раствором. Растения облучались круглосуточно тремя ксенонowymi дуговыми светильниками типа ДКСТВ 6000 с водным экраном и стеклянным фильтром типа СЗС-24, пропускающим участок спектра волн от 450 до 680 нм, обеспечивающими

максимальную облученность до  $500 \text{ Вт/м}^2$  в области ФАР. Подробные сведения об экспериментальной установке и методике эксперимента изложены в работе (Беркович, 1981).

Предположение об унимодальности функции показателя качества  $F(I, T, C_c)$ , которое подтверждается многочисленными данными об унимодальности частных статических характеристик  $F(I)$ ,  $F(T)$  и  $F(C_c)$ , позволило сформулировать задачу поиска максимума  $F$  по трем параметрам как задачу непрерывного поиска локального экстремума, совпадающего в данном случае с глобальным. В описанном эксперименте был применен поисковый симплексный алгоритм нелинейного математического программирования, в котором текущие координаты симплекса определялись по результатам пробных изменений трех выбранных факторов среды. Представленные в работе (Беркович и др., 1977) статические характеристики свидетельствуют о том, что максимальные значения фотосинтеза посева не лежат на границах допустимой области значений соответствующих параметров среды. Поэтому в эксперименте решалась задача безусловной динамической максимизации нестационарного фотосинтеза посева растений в трехмерном пространстве параметров.

Периодическая адаптивная оптимизация позволила отследить дрейф экстремума фотосинтеза посева пшеницы в онтогенезе. Динамика фотосинтеза за период вегетации показана на рис. 3.40. Кривая напоминала по форме онтогенетический ход фотосинтеза в факторостатных условиях, причем в периоды проведения оптимизации параметров среды относительные приросты скорости поглощения растениями углекислого газа увеличивались в пределах от 25 до 100 %. Таким образом, скорость возрастания фотосинтеза во время сеансов оптимизации значительно превышала средние скорости возрастания фотосинтеза в промежутки между этими сеансами на кривой, отражающей динамику фотосинтеза. Это свидетельствовало об эффективности адаптивной оптимизации фотосинтеза посева. Оптимальные режимы, найденные во время сеансов оптимизации и показанные на рис. 3.41, существенно изменялись в зависимости от возраста растений. Если концентрация углекислого газа изменялась в течение вегетации сравнительно мало, то разброс оптимальных значений облученности составлял  $120 \text{ Вт/м}^2$  ФАР, т. е. около 60 % от начального значения. Разброс оптимальных температур был равен  $18^\circ \text{C}$ , что составляло 50 % от конечного значения. Характерно, что максимум оптимальных температур приходился на период, когда скорость роста фотосинтеза в онтогенезе была максимальной. К моменту цветения и налива зерна оптимальная температура значительно уменьшилась (до  $18^\circ \text{C}$ ) и осталась на этом уровне до созревания зерна. Оптимальная концентрация углекислого газа возросла от приблизительно 0,1 %, характерных для периода до 20-го дня вегетации, до почти 0,4 % на последующих стадиях онтогенеза. Сравнение этого показателя с оптимальным значением концентрации углекислого газа для пшеницы, полученным в работе (Bugbee, 1995) и равным 0,12 %, косвенно подтверждает известный в физиологии растений факт, что условия, обеспечивающие максимальный вегетативный рост пше-

ницы после фазы колошения, могут не обеспечивать максимально возможной зерновой продуктивности. Отсюда следует, что критерии оптимальности агротехнологических режимов в адаптивных регуляторах космических оранжерей могут оказаться различными на разных фазах развития пшеницы.

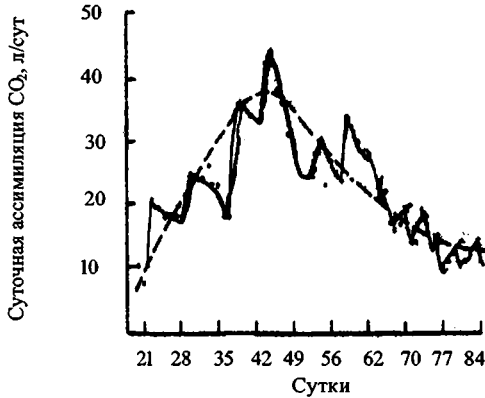


Рис. 3.40. Динамика фотосинтеза посева пшеницы за период вегетации

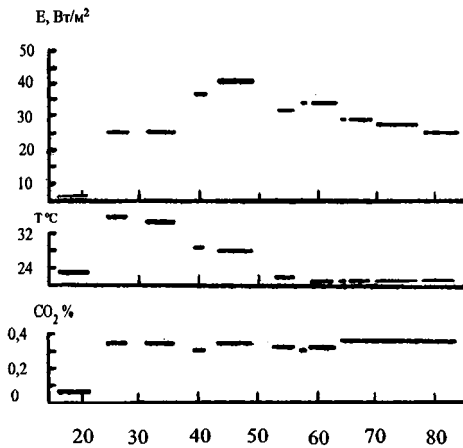


Рис. 3.41. Изменение оптимальных параметров среды в фитотроне в зависимости от возраста растений

Таким образом, полученные в описанных работах данные свидетельствуют о том, что системы контроля и управления с адаптивным управлением параметрами среды обитания растений могут оказаться мощным средством для улучшения энергетических характеристик в больших производственных космических оранжереях будущего. В современных же исследовательских оранжереях совершенствование систем контроля и управления идет, главным образом, по пути увеличения количества контролируемых и стабилизируемых параметров среды обитания, а также совершенствования контрольной аппаратуры для анализа показателей состояния растений (Scarascia-Mugnozza, Schettini, 2002; Berkovich, 1996). Это помогает повышать надежность научной информации, получаемой в космических экспериментах с растениями. Кроме того, для повышения надежности в космических оранжереях обычно предусматривают аварийные автоматические блокировки важнейших исполнительных механизмов для сохранения жизнедеятельности растений при нештатных отклонениях параметров среды. В качестве примера назовем автоматическое выключение света в случае недопустимого повышения температуры воздуха в вегетационной камере в оранжерее «Свет». Кроме того, космические оранжереи снабжают обычно аварийной сигнализацией на случай нештатных ситуаций и средствами переключения на ручной режим управления подсистемами. Для снижения трудозатрат экипажа данные о состоянии аппаратуры и растений в некоторых исследовательских космических оранжереях (например, «Свет»), иногда передают по телеметрическим каналам в наземный центр управления. В целом, потоки информации в системе контроля и управления, допустимый уровень надежности аппаратуры и степень автоматизации оранжереи определяются с учетом возлагаемых задач и ограничений ресурсов для каждой космической экспедиции.

## **ГЛАВА 4. СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ КОСМИЧЕСКИХ ОРАНЖЕРЕЙ, РАЗРАБОТАННЫХ С РОССИЙСКИМ УЧАСТИЕМ, И КОСМИЧЕСКИЕ ОРАНЖЕРЕИ БУДУЩЕГО**

В данной главе подробно рассмотрены особенности конструкций шести оранжерейных устройств для культивирования растений, а также представлены методики расчета их основных конструктивных параметров. Два из них, научно-исследовательские космические оранжереи "Свет" и "Лада", были разработаны совместно с иностранными коллегами и уже прошли проверку в работе в условиях реального космического полета. Конструкции других из рассмотренных здесь оранжерейных устройств являются прототипами, экспериментальными образцами и макетами производственных цилиндрических конвейерных космических оранжерей российской разработки.

Как уже было отмечено в главе 1, оранжерея "Свет" была разработана коллективом российских (под руководством д.м.н. Е.Я.Шепелева) и болгарских (под руководством к.т.н. Т.Ивановой) ученых в рамках программы "Интеркосмос" в 1980-е годы. Оранжерея была установлена и работала в технологическом модуле "Кристалл" ОК "Мир" с 10 июня 1990 г. С 15 июня до 9 августа 1990 г. в процессе основной экспедиции ЭО-16 космонавты А.Соловьев и А.Баландин провели первый бортовой эксперимент с растениями редиса и пекинской капусты. В подготовке и проведении первого космического эксперимента в оранжерее принимал участие один из авторов данной книги, д.т.н. Ю.А.Беркович. В дальнейшем в оранжерее "Свет" группой российских ученых под руководством д.б.н. В.Н.Сычева была проведена серия успешных и важных экспериментов с различными растениями; опыты проводили в течение почти 10 лет вплоть до затопления ОК в 2000 году. Для МКС к 2002 г. была создана другая российско-американская модель исследовательской оранжереи под названием "Лада", которую в настоящее время успешно использует в космических экспериментах коллектив исследователей под руководством д-ра Г.Бингэма с американской стороны и д.б.н. В.Н.Сычева – с российской.

В 1990 г. в Институте медико-биологических проблем совместно с Производственно-техническим объединением "Центр", возглавляемым А.А.Морозовым, в Москве была разработана оранжерея "Фитоцикл" как наземный прототип космической оранжереи с самораздвигающимся посевом растений на цилиндрической посадочной поверхности. В 1992 г. "Фитоцикл" в составе российской экспозиции был представлен на всемирной выставке цветов "Флориада", где получил высокую оценку специалистов. В течение последующих 12 лет в оранжерее были проведены десятки вегетационных экспериментов с зелеными культурами, в ходе которых были подтверждены ее высокие эксплуатационные качества.

Результаты экспериментов по выращиванию растений в оранжерее "Фитоцикл" позволили в дальнейшем спроектировать более совершенные макеты так называемых салатных или витаминных космических оранжерей, таких как "Витацикл", "Фитоцикл СД" и "Фитоконвейер", также описанные в данном разделе.

#### 4.1. Научно-исследовательские космические оранжереи "Свет" и "Лада"

##### 4.1.1. Краткое техническое описание оранжереи "Свет"

Фотография научно-исследовательской космической оранжереи "Свет" в лаборатории Института медико-биологических проблем представлена на рис. 4.1.

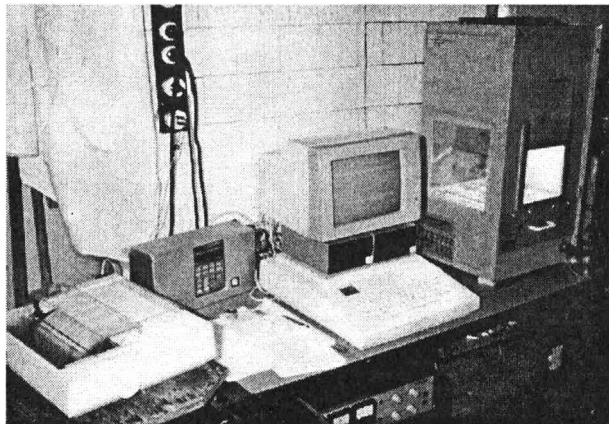


Рис. 4.1. Общий вид установки космической оранжереи "Свет"

Конструкция и принцип работы оранжереи были подробно описаны в ряде статей (Berkovich et al., 1991; Podolskiy et al., 1991; Иванова и др., 1991; Ivanova et al., 1990). В состав оранжереи "Свет" входили следующие основные блоки (рис. 4.2):

- блок выращивания растений (вегетационная камера);
- вегетационный сосуд;
- блок управления;
- блок освещения.

Кроме того, оранжерея была снабжена бортовой 20-литровой емкостью для воды и фотокамерой для регистрации внешнего вида растений. В комплект наземного оборудования входила также работающая на базе персонального компьютера телеметрическая контрольно-измерительная аппаратура для приема на Земле сигналов, передаваемых по каналу передачи



телеметрической информации с датчиков, входящих в состав оранжереи. В табл. 4.1 представлены весовые и габаритные характеристики космической оранжереи "Свет".

Оранжерея "Свет" имела уникальные для своего времени эксплуатационные характеристики. Посадочная площадь оранжереи "Свет" составляла около 0,1 м<sup>2</sup>, объем блока выращивания растений – 0,07 м<sup>3</sup>, среднесуточная потребляемая мощность – 200 Вт. В оранжерее была предусмотрена возможность передвижения блока освещения по высоте вегетационной камеры в зависимости от высоты растений.

Таблица 4.1

Весовые и габаритные характеристики основных блоков космической оранжереи "Свет"

Блоки	Габаритные размеры аппаратуры, мм	Весовые характеристики блоков, кг
выращивания растений	460 x 778 x 366	12 ± 0,5
вегетационный сосуд	415 x 122 x 343	11 ± 0,5
управления	380 x 200 x 110	4,5 ± 0,3
освещения	362 x 190 x 360	6,5 ± 0,3

Блок освещения включал 11 люминесцентных ламп мощностью 8 Вт каждая. На рис. 4.2 представлена зависимость средней плотности потока фотосинтетически активных фотонов от расстояния между светильником и кюветами оранжереи.

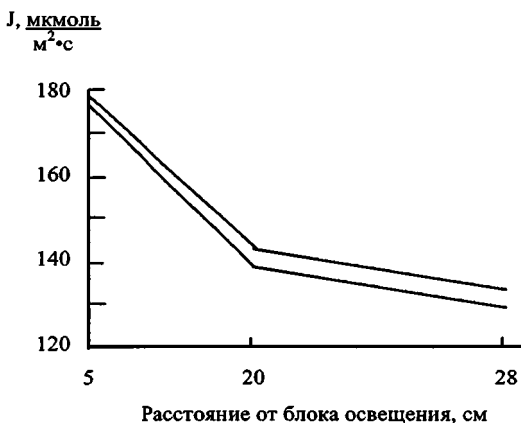


Рис. 4.2. Плотность потока фотонов над вегетационным сосудом космической оранжереи "Свет"

В 1995–1999 годах в процессе подготовки к российско-американским космическим экспериментам по программе оранжерея "Свет-2" блок освещения оранжереи был

модернизирован и плотность потока фотосинтетически активных фотонов под лампами была доведена до  $(350-380) \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . В центре блока освещения был установлен вытяжной вентилятор, обеспечивающий осушение и охлаждение воздуха в блоке выращивания растений, а также охлаждение субстрата в вегетационном сосуде за счет испарения воды через перфорацию в его стенках и теплообмена стенок вегетационного сосуда с потоком воздуха. Диапазон скоростей вертикального воздушного потока в блоке выращивания растений при включенном вентиляторе составил  $0,08-0,3 \text{ м/с}$ . Датчики температуры и влажности воздуха были расположены в центре вегетационной камеры на откидной стойке.

Вегетационный сосуд (или корневой модуль) оранжереи "Свет", схематично показанный на рис. 4.3, был выполнен из светонепроницаемого гидрофобного материала. Боковые стенки и дно были покрыты изнутри слоем гидрофобного материала, проницаемого для воздуха. Кювета была накрыта съемной непрозрачной крышкой из гидрофобного пористого материала с щелевидными отверстиями для выхода многослойных синтетических фитилей.

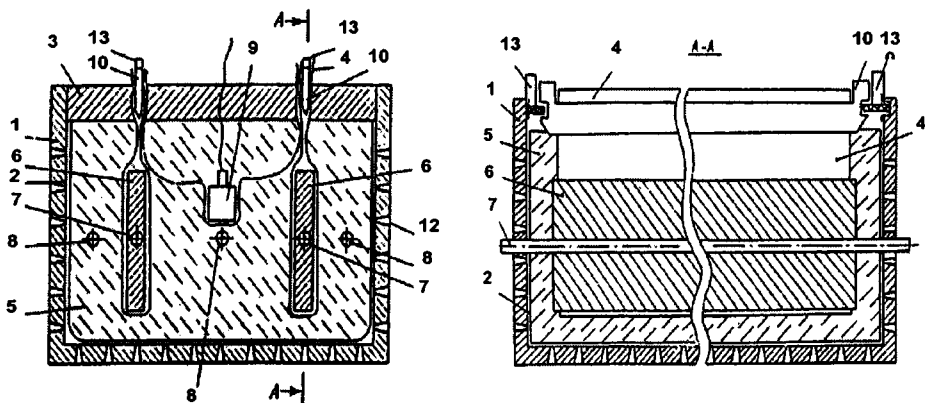


Рис. 4.3. Устройство кюветы вегетационного сосуда космической оранжереи "Свет".

- 1 – кювета; 2 – поролоновый чехол; 3 – гидрофобная крышка; 4 – фитиль;  
 5 – почвозаменитель; 6 – пористый гидроаккумулятор; 7 – трубопровод подачи воды;  
 8 – трубопровод подачи воздуха; 9 – датчик влажности; 10 – посадочная планка; 11 – гнездо для семян; 12 – конусное отверстие; 13 – фиксатор

Перед работой кювету заполняли почвозаменителем, в который были погружены вертикальные, параллельные друг другу, пластины из пористого гидрофильного материала.

Внутри вертикальных пластин и между ними на глубине, равной половине толщины слоя почвозаменителя, устанавливали горизонтальные перфорированные трубопроводы отдельно для подачи воды и воздуха. Нижние концы многослойных фитилей имели контакт с вертикальными пластинами и с корпусом датчика влажности. Между верхними концами фитилей установлены в фиксированном положении посадочные планки, выполненные из пластика толщиной 3–4 мм, со сквозными коническими гнездами для семян на боковых поверхностях. Специальные выступы-фиксаторы на концах планки обеспечивали устойчивое положение планки в кювете и облегчали ее установку и выемку. Посадочное устройство, примененное в оранжерее, изображено на рис. 4.4.

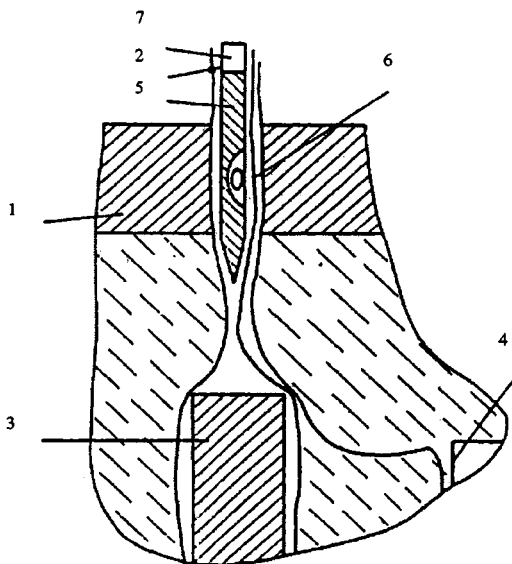


Рис. 4.4. Посадочный узел вегетационного сосуда космической оранжереи "Свет".

1 – гидрофобная крышка; 2 – фитиль; 3 – пористый гидроаккумулятор; 4 – датчик влажности; 5 – посадочная планка; 6 – гнездо для семян; 7 – фиксатор

Корневой модуль оранжереи подготавливался и работал следующим образом. Перед полетом семена растений вставляли в гнезда на боковой стороне посадочных планок и закрепляли с помощью водорастворимого клея. Благодаря тому, что толщина посадочной планки была приблизительно равна диаметру семени, семена почти не выступали за габариты

планки, что предохраняло их от механического повреждения при посадке. Экспериментально было показано, что такая технология посадки обеспечивает хорошую всхожесть и выход проростков как салата и редиса, так и пшеницы.

На борту космического аппарата посадочные планки с семенами вставляли между верхними концами фитилей на определенную глубину до фиксации и подавали заданную дозу воды через перфорированные горизонтальные трубопроводы. Вода начинала распространяться сначала по пористым гидрофильным пластинам, а затем по многослойным фитилям, достигая наконец семян и датчика влажности. Постепенно влага от пористых пластин начинала распространяться по объему гранульного почвозаменителя. Подачу воздуха для аэрации корней растений с удалением образующейся в процессе корневого дыхания углекислоты осуществляли через горизонтальные перфорированные трубопроводы, установленные между гидрофильными пластинами на глубине, равной половине толщины слоя почвозаменителя. Подаваемый воздух выходил не только через посадочную поверхность, но и через перфорированные отверстия в стенках кюветы. Коническая форма отверстий (большими диаметрами наружу) в боковых стенках кюветы, а также гидрофобный материал, выстилающий внутренние стенки кювет, предохранял от возможности затопления водой отверстий и потерь капельной жидкости из кюветы. По мере высыхания многослойных волокнистых фитилей и почвозаменителя вследствие испарения воды из кюветы и потребления ее растениями с датчика влажности поступал сигнал на подачу очередной дозы воды.

Вегетационный блок оранжеереи "Свет" включал два изолированных корневых модуля, заполненных искусственным почвозаменителем с погруженными в него датчиками температуры термоимпульсного типа. Эти датчики позволяли измерять дискретно (каждый час) влажность субстрата. Датчики были включены в автоматические контуры управления подачей воды в кюветы, порядок работы которых задавали на пульте блока управления. Контур включал в себя логическую схему регулирования, подающую электрический сигнал управления на насос и объект управления – почвозаменитель (субстрат) с погруженным в него датчиком влажности почвозаменителя. Сигнал с датчика влажности поступал на компаратор, где происходило его сравнение с сигналом установки по влажности почвозаменителя; сформированный сигнал рассогласования поступал затем в логическую схему регулирования. Регулятор влажности почвозаменителя работал дискретно с периодом включения в десятки минут. Логическая схема регулирования была построена по следующему алгоритму:

$$U(t_H, \tau, K) = \begin{cases} 0, & \text{при } \Delta\varphi \leq \delta; \\ KU_0(t_H, \tau), & \text{при } \Delta\varphi > \delta. \end{cases} \quad (4.1)$$

где  $t_H$  – длительность импульса сигнала, т.е. время одноразового включения насоса;  $\delta$  – величина зоны нечувствительности датчика влажности;  $\varphi$  – период подачи импульсов;  $K$  – количество поданных импульсов.

$$K = \begin{cases} 1, & \Delta\varphi \in [\delta, 2\delta]; \\ 2, & \Delta\varphi \in (2\delta, 3\delta); \\ 3, & \Delta\varphi \in [3, 4\delta]. \end{cases} \quad (4.2)$$

$U_0(t_H, \varphi)$  – импульс электрического сигнала с амплитудой  $U_n$ , длительностью  $t_H$  и периодом подачи импульсов  $\varphi$ ;  $U_n$  – напряжение электропитания насоса.

Согласно результатам испытаний датчиков влажности в вегетационном сосуде оранжереи "Свет", зона нечувствительности датчиков составила на Земле 3 % от значения, соответствующего полному влагонасыщению почвозаменителя, а при воздействии факторов космического полета – 9–12 % (Подольский, 2000; Ivanova et al., 1990).

Блок управления базировался на восьмиразрядном микропроцессоре с вмонтированным таймером и был снабжен пультом контроля и управления. Оператор с помощью клавиатуры на пульте мог задавать и контролировать параметры среды обитания растений и выбирать различные режимы работы оранжереи. Блок управления оранжереи "Свет" имел три автоматических режима управления: тестовой проверки (программа 1); первоначального увлажнения почвозаменителя в вегетационном сосуде – "заправка оранжереи" (программа 2) и основной режим (программа 3). Кроме того, в блоке управления были предусмотрены резервный режим для обеспечения увлажнения субстрата в вегетационном сосуде по одной из семи заданных циклограмм, а также ручной режим управления всеми агрегатами и исполнительными механизмами оранжереи. Наконец, телеметрический выход оранжереи позволял передавать телеметрическую информацию, которую принимали в наземном пункте управления с помощью специального комплекса измерительной аппаратуры. Телеметрический кадр включал в себя параметры, перечисленные в табл. 4.2.

В первом бортовом эксперименте в корневых модулях оранжереи "Свет" в качестве корневой среды использовали гранульный соленасыщенный природный цеолит "Балканин" с размером гранул от 1 до 3 мм. В последующих экспериментах наряду с "Балканином" использовали гранульный силикатный почвозаменитель "Турфейс" с добавлением медленно действующих удобрений (Подольский, 2000).

Параметры, передаваемые в телеметрическом кадре оранжереи "Свет"

Наименование параметра	Обозначение параметра в кадре	Диапазон измерения и погрешность	Периодичность измерения, ч
Порядковый номер кадра	No	1+6	4
День от начала опыта	ДЕН	-	24
Температура воздуха на входе в блоке выращивания растений, °С	ТВ1	(15+35)±1	4
Температура воздуха в вегетационной камере, °С	ТВ2	(15+35)±1	4
Относительная влажность воздуха в вегетационной камере, %	ВВ	(50+100)±5	4
Температура субстрата в 1-й кювете вегетационного сосуда, °С	ТС1	(15+35)±1	4
Температура субстрата во 2-й кювете вегетационного сосуда, °С	ТС2	(15+35)±1	4
Влажность субстрата в 1-й кювете вегетационного сосуда, %	ВС1	(0+100)±10	1
Влажность субстрата во 2-й кювете вегетационного сосуда, %	ВС2	(0+100)±10	1
Число включений насоса в 1-й кювете вегетационного сосуда, дозы	РВ1 дозы	0+12	4
Число включений во 2-й кювете вегетационного сосуда, дозы	РВ2 дозы	0+12	4
Продолжительность периода освещения, мин	ППО	0+240	4
Число включений компрессора аэрации	ВА	0+4	4
Наличие неисправностей	НС	1 – есть; 0 – нет.	4

После посева семян и подачи воды в вегетационный сосуд оранжереи в вегетационной камере включали свет, чтобы проростки в отсутствие силы тяжести могли ориентироваться за счет фототропических реакций. Непрозрачный материал, из которого

были выполнены кюветы, предотвращал развитие фотоавтотрофных микроорганизмов в почвозаменителе.

Отличия оранжереи "Свет" от более ранних космических вегетационных устройств состояли в следующем:

- осуществлялось автоматическое управление исполнительными механизмами, что обеспечивало возможность регулирования поступления воды в вегетационный сосуд и вентиляции вегетационной камеры;
- осуществлялся автоматический контроль и анализ неисправностей во всех блоках оранжереи в процессе ее работы;
- было предусмотрено автоматическое выключение света при опасном для растений изменении параметров среды в гермокабине космического корабля (например, при повышении температуры);
- была предусмотрена передача на Землю информации о параметрах среды обитания растений и состоянии основных узлов и блоков оранжереи по телеметрическому каналу связи;
- осуществлялась принудительная аэрация почвозаменителя в вегетационном сосуде путем периодического включения компрессора, подающего воздух в распределительное кольцо из перфорированных трубок, погруженных в почвозаменитель;
- конструкция вегетационного сосуда предусматривала дополнительные средства для охлаждения почвозаменителя и снижения интенсивности засоления его верхнего слоя за счет испарения воды через отверстия в боковых стенках и дне вегетационного сосуда благодаря потоку воздуха от вентилятора, смонтированного в блоке освещения;
- были применены оригинальные посадочные устройства в виде планок с наклеенными семенами, вставляемые между обкладками многослойного фитиля, погруженного в почвозаменитель.

#### **4.1.2. Параметры среды обитания растений в оранжерее "Свет" на борту орбитального комплекса "Мир"**

В период работы оранжереи "Свет" на борту ОК "Мир" проводили непрерывный мониторинг и анализ параметров среды обитания по проходящим с борта телеметрическим кадрам. Потери телеметрической информации из-за помех в телеметрическом канале связи по времени составили около 13 %. Результаты анализа данных, полученных во время работы космической экспедиции ЭО-16, позволили сделать следующие заключения о параметрах

среды в оранжеере "Свет" в процессе первого космического эксперимента (Podolskiy et al., 1991; Иванова и др., 1991; Ivanova et al., 1990).

1. Диапазон значений температуры воздуха в технологическом модуле "Кристалл" в период работы оранжеери составил от 17 до 23 °С, за исключением двух суток, когда по соседству с оранжеерей было включено оборудование для плавки кристаллов. В этот период перегрев воздуха в вегетационной камере оранжеери составил 8 °С, что свидетельствовало о недостаточной мощности вентилятора, предназначенного для отвода тепла из камеры. После снижения температуры в модуле "Кристалл" перепад температур в вегетационной камере оранжеерен вернулся в допустимый диапазон.
2. Изменение температуры в модуле сопровождалось изменением средних значений перепада температур в вегетационной камере, причем отмечали наложение скачков температуры с амплитудой около +1 и -1 °С соответственно в световые и темновые периоды на кривую среднего значения перепада температур. Такой характер динамики перепада температур воздуха в вегетационной камере был обусловлен колебаниями температуры почвозаменителя, которые тоже имели период, связанный со сменой световых и темновых периодов, но были почти вдвое меньше по амплитуде. Это, по-видимому, было связано с большей тепловой инерционностью почвозаменителя по сравнению с воздухом в вегетационной камере.

При значениях температуры воздуха в вегкамере, ТВ2, ниже 20 °С ее отличие,  $\Delta T_2$ , от температуры в субстрате корневого модуля, ТС1, в среднем было близко к нулю. С повышением ТВ1 до 21–22 °С среднесуточное значение  $\Delta T_2$  увеличилось до 3–4 °С за счет повышения ТВ2 при стабилизации значения ТС1 почти на прежнем уровне. Эти данные также указывали на большую тепловую инерцию почвозаменителя и на эффективное охлаждение стенок вегетационного сосуда потоком воздуха. При увеличении ТС1 на период с 35-х по 37-е сутки эксперимента перепад температур  $\Delta T_2$  в световой период резко возрос приблизительно до 13 °С, а в темновой – уменьшился до -3,5 °С. Такой характер зависимости  $\Delta T_2(t)$  был обусловлен значительной тепловой инерцией почвозаменителя, который, прогреваясь в течение светового периода, не успевал охладиться в течение темнового, в то время как воздух в вегетационной камере быстро охлаждался в течение темнового периода благодаря работе вентилятора.

Показатели относительной влажности воздуха в вегетационной камере и в кабине космического корабля в течение эксперимента различалась не более чем на 15 %. В целом, система охлаждения в космической оранжеере "Свет" обеспечивала довольно благоприятные температурные условия в вегетационной камере и корнеобитаемой зоне.



Особенно интересные результаты в описываемом космическом эксперименте (рис. 4.4) были получены при анализе кривых динамики влажности почвозаменителя в вегетационном сосуде в полете и на Земле после отработки программы первоначального увлажнения. Программа первоначального увлажнения сухого почвозаменителя в вегетационном сосуде оранжереи "Свет" предусматривала подачу 30 доз воды в течение 10 ч по 3 дозы в час. В условиях микрогравитации величина одной дозы составила около 11 мл, а среднесуточный расход воды в вегетационном сосуде без растений – 40 мл. Измеренная полная гравитационная влагоемкость композиции "гидрофильные пластины – многослойные фитили" была равна  $300 \pm 25$  мл. Как видно из представленных на рис. 4.4 данных, характер водораспределения в вегетационном сосуде в условиях микрогравитации и на Земле существенно различался, в частности, было отмечено значительное замедление поступления воды в центральную часть корневых модулей. В последующих опытах в оранжерее "Свет", проведенных в условиях космического полета, с помощью специально разработанных дополнительных датчиков влажности было выявлено замедление капиллярной миграции воды в гранульный почвозаменитель ("Балканин") после подачи дозы воды до 10 мм/ч и менее (Подольский и др., 1998; Подольский, 2000). Причины такого эффекта были обусловлены, вероятно, воздействием силы тяжести в наземном контроле и ее отсутствием в опыте на борту, что авторами не было учтено и не анализировалось (необходимость учета фактора силы тяжести в исследованиях влагопереноса в пористых средах, как и краевых эффектов, рассмотрена в разделе 3.2.3 книги). Практически полное отсутствие переноса влаги в гранульный почвозаменитель подтвердили показания датчиков влажности, зарегистрированные в течение первых трех дней работы в рабочем режиме. Наши расчеты показали, что при реальной влагоемкости системы фитилей и гидроаккумуляторов в кювете содержание воды в почвозаменителе снизилось за первые дни не менее чем на 20–30 %, а водный потенциал в корнеобитаемой зоне опустился ниже уровня  $-3,0$  кПа, т.е. в область потенциалов/влажности с заметным снижением продуктивности растений. При этом средняя влажность пористых пластин и фитилей в вегетационном сосуде в момент подачи первой дозы воды составляла не менее 70 %. Эту ситуацию наблюдали неоднократно в течение эксперимента. В результате каждый раз после подачи очередной дозы воды в субстрате вокруг фитилей в вегетационном сосуде создавалась локальная переувлажненная зона, которая очень долго рассасывалась, а основной объем почвозаменителя – носителя минерального питания – в это время был недостаточно увлажнен. Отсутствие достаточного влагопереноса в корневую зону растений явилось причиной резкого замедления их роста. В последующих экспериментах в оранжерее "Свет" использовали почвозаменитель с меньшим эффективным размером частиц, что позволило уменьшить колебания водного потенциала в корнеобитаемой зоне (Подольский, 2000). Однако контроль за динамикой водных потенциалов в корневом

модуле после подачи очередной дозы воды и до окончания переходного процесса миграции воды к месту расположения датчика влажности в подобных системах осуществлять не удастся, что явилось принципиальным недостатком данной системы корневого снабжения. Другим недостатком является необходимость повторных тарировок датчиков влажности после любых изменений гидрофизических свойств корнеобитаемой среды, неизбежных при длительном непрерывном выращивании растений в одном и том же вегетационном сосуде. Для возможности устранения этих недостатков и трудностей нами была предложена система корневого снабжения с реверсивной водоподачей, описанная в главе 6.

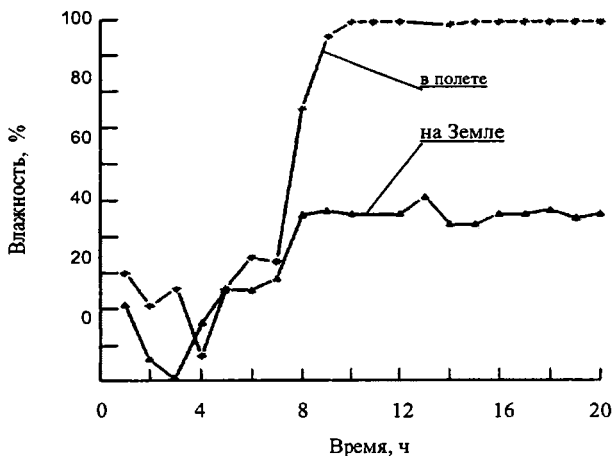


Рис. 4.4. Динамика показателей датчиков влажности субстрата в оранжерее "Свет" после отработки программы первоначального увлажнения в условиях микрогравитации и наземном контроле

#### 4.1.3. Краткое техническое описание оранжерей "Лада"

В 2002 г. ГНЦ РФ – ИМБП РАН (Россия) и Space Dynamics Laboratory (США) завершили разработку и изготовление исследовательской космической оранжерей "Лада", включавшей в себя четыре основных компонента: блок контроля и управления, два вегетационных модуля и емкость для воды (рис. 4.5). Дизайн, структура и основные технологические решения оранжерей "Лада" по свидетельству авторов работы (Bingham et al., 2002), аналогичны таковым в оранжерее "Свет", но объем вегетационных камер "Лады" примерно вдвое меньше, чем у оранжерей "Свет". Это позволило установить оборудование оранжерей

на стенной панели жилого отсека, что обеспечило свободный доступ космонавтам к растениям и создало положительный психологический эффект от присутствия растений на борту. Помимо уменьшения объема, конструкция оранжереи "Лада" претерпела следующие изменения. Во-первых, оранжерея имеет две идентичные, независимо друг от друга контролируемые вегетационные камеры, что позволяет одновременно выращивать растения контрольного и опытного вариантов. Во-вторых, при общем уменьшении объема оранжерей несколько увеличен объем корневого модуля, что дает возможность проводить более детальные исследования распределения воды и диффузии кислорода в корнеобитаемой зоне. С этой целью корневые модули оборудованы дополнительными датчиками параметров среды.

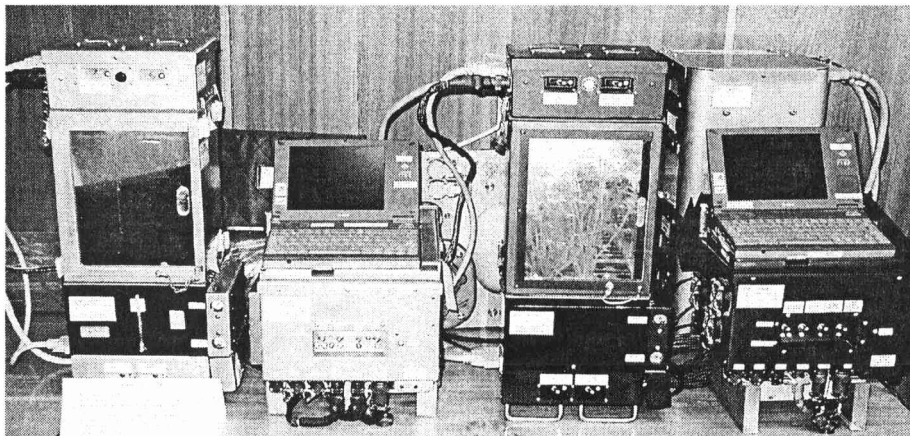


Рис. 4.5. Общий вид аппаратуры космической оранжереи "Лада"

Блок контроля и управления включает в себя блоки питания, дисплей, систему получения и контроля данных и блок хранения информации. В блоке контроля и управления предусмотрены также разъемы для подключения компьютерной мыши, принтера и других периферийных устройств. Напряжение электропитания всех блоков равно 28 В. Блок контроля и управления обеспечивает возможность сбора информации о ходе эксперимента и занесения ее в память в автоматическом режиме с интервалом 20 или 60 мин с помощью контроллера данных. Номинальная мощность оранжереи "Лада", потребляемая на борту МКС, составляет 60 Вт.

Каждый вегетационный модуль состоит из корневого блока, листовой (вегетационной) камеры и блока освещения, расположенных друг над другом. Листовая камера, расположенная

в центре вегетационного модуля между корневым блоком и блоком освещения, имеет вертикальный корпус прямоугольного сечения высотой 25 см. В камере на специальном каркасе на трех уровнях по высоте установлены датчики контроля параметров среды. Для уменьшения потерь света стены листовой камеры покрыты отражающей пленкой. Камера может быть легко заменена на более высокую или более низкую, в зависимости от высоты выращиваемой культуры.

Корневой блок, расположенный под листовой камерой, также состоит из трех модулей – контейнера с почвозаменителем высотой 9 см, модуля водоподачи и модуля коммутации датчиков. Посадочная площадь корневого модуля составляет  $14 \text{ см} \times 18 \text{ см} = 252 \text{ см}^2$ . Размеры корневого блока достаточны для свободного развития корневой системы в течение длительного эксперимента и размещения датчиков для исследования процессов в корнеобитаемой зоне. На дне контейнера имеется 20 отверстий для вывода кабелей от датчиков, размещенных в корнеобитаемой зоне, в модуль коммутации датчиков, расположенный непосредственно под контейнером. Контейнер с почвозаменителем оснащен четырьмя пористыми трубками, проходящими по всей его длине и обернутыми фитильной тканью. Вода подается в трубки миниатюрным перистальтическим насосом через водораспределительную шину из модуля водоподачи, в котором установлен также резервный насос. В контейнере корневого блока могут быть установлены до 16 сенсорных датчиков, из них 4 датчика концентрации кислорода, 6 датчиков влажности почвозаменителя (они же – датчики температуры почвозаменителя), два датчика влажности фитилей и четыре микротензиометра. В верхней части корневого блока проходят вентиляционные каналы, выполненные в виде четырех трубок с отверстиями. По вентиляционным каналам воздух из кабины подается в нижнюю часть листовой камеры для вентиляции посева.

Блок освещения содержит четыре люминесцентные лампы, по две лампы в камере, которые легко могут быть заменены в случае выхода из строя. Блок включает также два вытяжных вентилятора. Воздух с помощью вентиляторов подается через вентиляционные каналы в листовую камеру, затем проходит через блок освещения, охлаждая лампы, и, наконец, выходит обратно в кабину. Третий маленький вентилятор установлен на верхнем конце стойки для крепления датчиков внутри вегетационной камеры, чтобы направлять воздух к датчику температуры. В блоке освещения установлены также датчик относительной влажности воздуха, инфракрасный датчик, измеряющий температуру листьев, и цифровая камера для фотографирования посева. При отсутствии растений фотосинтетический поток фотонов на уровне посадочной поверхности корневого блока составляет  $230 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

В состав аппаратуры оранжерей включена цилиндрическая емкость для воды объемом 5 л соединенная с обоими насосами корневого блока. Предусмотрен интерфейс для пополнения емкости водой из системы водообеспечения орбитального комплекса.

К сожалению, публикациями с результатами вегетационных опытов на оранжерее "Лада" авторы не располагают, поэтому эти данные не включены в данную монографию.

#### 4.1.4. Основные результаты космических опытов с растениями в оранжерее "Свет"

Целью первого эксперимента в оранжерее "Свет" на ОК "Мир" явилось изучение особенностей онтогенетического развития, морфогенеза, продуктивности и биохимического состава овощных культур в условиях космического полета, а также уточнение функциональных и эксплуатационных характеристик оранжерей "Свет". Растения редиса, сорт "Красный с белым кончиком", и пекинской капусты, сорт "Хибинская", были одновременно высажены в 1-ю и 2-ю кюветы вегетационного сосуда соответственно. По истечении трех недель у полетных растений было отмечено значительное отставание в развитии по сравнению с наземным контролем, выращиваемом синхронно в головном образце оранжерей "Свет", несмотря на то, что всходы появились вовремя и всхожесть была не ниже 80 % от контроля. Замедление развития растений в условиях космического полета было значительным: 21-дневные растения капусты и редиса соответствовали растениям контрольного варианта в возрасте 10–11 сут; в возрасте 54 сут полетные растения обоих видов находились в вегетативной фазе развития, хотя растения, выращиваемые на Земле, к этому сроку уже зацвели. Корнеплоды 54-дневных растений редиса в полете соответствовали таковым у 25-дневных растений на Земле, однако форма и окраска корнеплодов были нормальными. Наконец, растения, выращенные в условиях космического полета, отличались темно-зеленой окраской и гофрированной поверхностью листьев (рис. 4.6). Анализ доставленных на Землю растений показал, что сухая масса полетных растений после почти двух месяцев выращивания меньше в 2–5 раз и в 5–10 раз для редиса и капусты соответственно по сравнению с наземным контролем, что свидетельствовало о существенном снижении эффективности фотосинтеза в полете. Причиной столь значительных отличий между растениями, выращенными в условиях космического полета и на Земле, явились неблагоприятные условия увлажнения в корнеобитаемой зоне в полете.

Таким образом, режим работы регулятора влажности почвозаменителя, установленный по результатам наземных экспериментов, в условиях космического полета не обеспечил оптимального увлажнения корневой системы растений. Причина лежала в отсутствии в период проектирования оранжереи необходимой информации (моделей) по влагопереносу в пористых средах в условиях невесомости, о которой говорилось в разделе

3.2.3. Тем не менее в этом эксперименте впервые была показана возможность прохождения растениями важнейших стадий онтогенеза, в частности, стадии накопления и оттока пластических веществ в корнеплод у редиса. Апробация аппаратуры оранжереи "Свет" в условиях космического полета в целом оказалась успешной. В течение почти двух месяцев оранжерея обеспечивала автоматическое управление параметрами среды обитания растений и передачу на Землю необходимой информации.

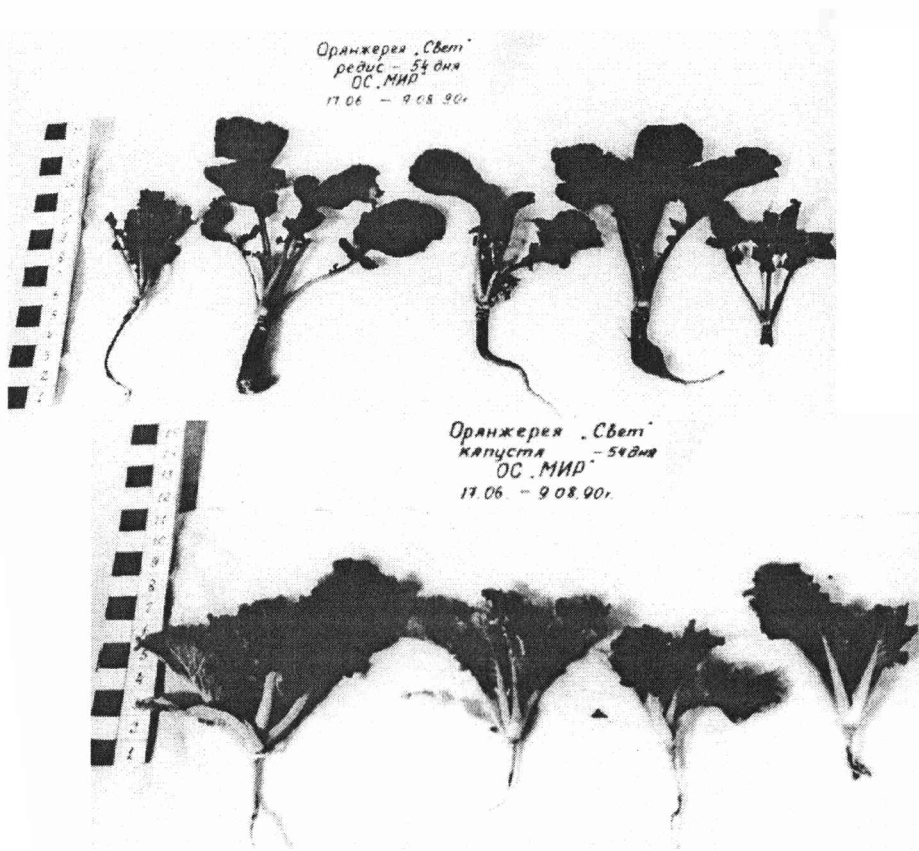


Рис. 4.6. Растения редиса и листовой капусты, выращенные в оранжерее "Свет" на ОК "Мир" в 1990 г.

В последующих бортовых экспериментах в оранжерее "Свет" неоднократно проводили длительные эксперименты по выращиванию различных культур (Levinskikh et al., 1997;

Левинских и др., 1999; Сычев и др., 1999; Сычев и др., 2002). В этих опытах растения не только нормально завершили онтогенетический цикл развития, но и образовали жизнеспособные семена, например, у пшеницы в нескольких последовательных вегетациях. Таким образом, было доказано, что совокупность факторов космического полета не является принципиальным препятствием для успешного выращивания растений при условии обеспечения в космической оранжерее адекватных условий среды.

#### **4.2. Экспериментальные образцы производственных цилиндрических конвейерных оранжерей**

Экспериментальные образцы производственных цилиндрических конвейерных оранжерей были построены в разные годы для экспериментальной проверки предложенного нами метода выращивания самораздвигающихся посевов растений на выпуклых цилиндрических посадочных поверхностях. Анализ преимуществ такого метода будет описан в главе 5. Здесь приводится описание разработанных установок этого типа и результаты их экспериментальной апробации.

##### **4.2.1. Краткое техническое описание оранжерей "Фитоцикл" и "Фитоцикл СД"**

Целью создания установок "Фитоцикл" и "Фитоцикл-СД" являлось следующее:

- 1) проверка возможности выращивать самораздвигающийся посев растений в наземных условиях;
- 2) проверка технологии выращивания конвейерного посева растений на цилиндрической посадочной поверхности;
- 3) измерения светораспределения, а также морфометрических и биохимических характеристик растений в самораздвигающихся посевах под различными источниками света;
- 4) оценка продукционных характеристик посевов в самораздвигающихся посевах под различными источниками света.

Следует обратить внимание на то, что система корневого снабжения в указанных оранжереях не была предназначена для работы в условиях невесомости и использовала простейший способ регулирования водного потенциала в корневой зоне растений, основанный на использовании силы тяжести.

Наземный макет космической оранжереи "Фитоцикл" был предназначен, в основном, для изучения характеристик самораздвигающихся посевов зеленных культур: салата, капусты листовой, свеклы листовой, укропа, петрушки и других – на цилиндрической посадочной

поверхности при искусственном освещении. Фотография оранжереи "Фитоцикл" дана на рис. 4.7. Основные технические параметры оранжереи представлены в табл. 4.3.

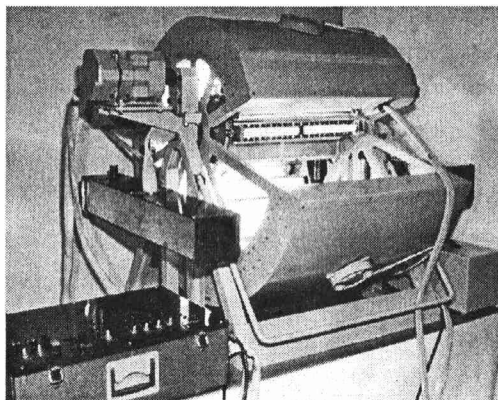


Рис. 4.7. Общий вид оранжереи "Фитоцикл"

Таблица 4.3

Основные технические параметры оранжереи "Фитоцикл"

Размеры вегетационной камеры, м:	
длина	0,62
диаметр	0,78
Посадочная площадь, м <sup>2</sup>	0,30
Освещаемая площадь, м <sup>2</sup>	0,85
Объем камеры, м <sup>3</sup>	0,17
Число корневых модулей	10
Тип ламп	люминесцентные белого света ЛБ-20
Количество ламп	13
Поток фотосинтетических фотонов на расстоянии 5 см от ламп, мкмоль/м <sup>2</sup> ·с	120 + 150
Количество вентиляторов ВН-2	4
Мощность электропотребления, кВт	0,35
Количество емкостей для питательного раствора, шт.	2
Объем емкости для питательного раствора, л	7



Оранжерея "Фитоцикл" состоит из силовой рамы с мотором-редуктором, выходным редуктором и емкостями для воды или питательного раствора; блока корневых модулей; блока освещения и вентиляции; пульта управления; блока электропитания и соединительных жгутов. Конструкция оранжереи позволяет регулировать частоту реверсивного вращения блока вегетационных сосудов совместно с блоком освещения на угол  $360^\circ$  с помощью мотора-редуктора через выходной редуктор в диапазоне от 4 до 11 об/ч. Мотор-редуктор представляет собой регулируемый реверсивный малооборотный электродвигатель постоянного тока со встроенным понижающим редуктором. Выходной редуктор предназначен для дальнейшего понижения числа оборотов выходного вала мотора-редуктора и имеет два фиксированных передаточных отношения 1:19 и 1:20.

В оранжерее предусмотрена возможность изменения высоты емкости для питательного раствора по отношению к горизонтальной оси вращения для регулирования водного потенциала в водоподводящем жгуте. Для этого в каждом из вертикальных кронштейнов рамы сделаны прорези для установки в них емкости на разных уровнях с шагом, равным 5 см. Емкость оснащена индикатором уровня жидкости поплавкового типа, имеющим индикаторную шкалу с ценой деления 0,2 л.

В зависимости от температуры воздуха в вегетационной камере оранжереи могут быть включены от 1 до 4 вентиляторов, регулирующих количество воздуха для охлаждения растений. При повышении температуры воздуха в вегетационной камере до  $+34^\circ\text{C}$  в оранжерее предусмотрено автоматическое отключение света.

Блок корневых модулей оранжереи "Фитоцикл" содержит 10 вегетационных сосудов, называемых корневыми модулями, установленных в радиальных пазах торцевых дисков, закрепленных на центральном валу. Центральный вал, выполненный полым из нержавеющей стали и установленный в шарикоподшипниках силовой рамы, имеет сквозные продольные прорези на боковой поверхности. В продольные прорези вставлены пробки из гигроскопичного поропласта пенополивинилформаль (ППВФ). Снаружи центральный вал обернут слоем листового ППВФ толщиной 4–5 мм. Внутренняя полость вала заполнена жгутом из ППВФ, концы которого выходят за размеры центрального вала и опускаются в емкость для воды или питательного раствора до самого дна. Корневые модули, вставленные в пазы торцевых дисков, в собранном состоянии составляют 10-гранную призму блока корневых модулей. Корневые модули в "Фитоцикле" в поперечном сечении имеют форму усеченного кругового сектора с углом при вершине, равным  $36^\circ$ . Каждый корневой модуль выполнен в виде тонкостенного каркаса с натянутой на него мелкой сеткой из нержавеющей стали (рис. 4.8). В сетчатом дне корневого модуля предусмотрены прорези, в которые вставлены жгуты из листового ППВФ. При намокании ППВФ становится студнеобразным гибким фитилем,

обеспечивающим капиллярный перенос влаги из емкости с водой или раствором в корневой модуль с капиллярно-пористым почвозаменителем, причем без подтекания влаги при правильно выбранной высоте емкости. Корневой модуль может быть заполнен как гранулированным, так и волокнистым почвозаменителем и снабжен крышкой, имеющей две продольные прорези для установки посадочных планок с семенами. Во время работы вегетационная камера вращается вокруг своей оси, поэтому распределение воды по объему корневого модуля происходит как под действием капиллярных сил, так и за счет попеременного гравитационного перетока по вращающимся в блоке корневым модулям. Таким образом, в "Фитоцикле" осуществлена подача воды из неподвижного резервуара во вращающийся блок корневых модулей.

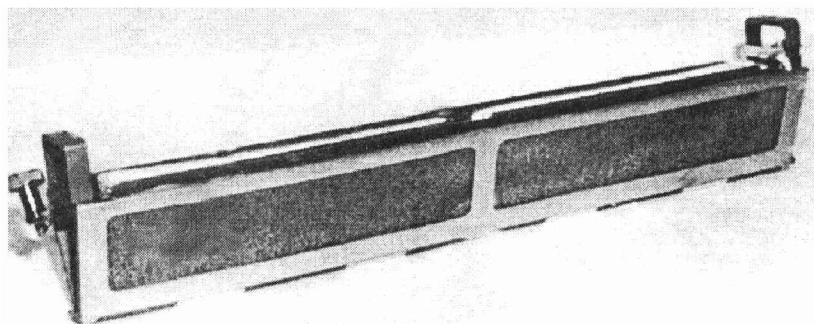


Рис. 4.8. Корневой модуль оранжереи "Фитоцикл"

Как уже было отмечено, мотор-редуктор в оранжерее "Фитоцикл" может обеспечить скорость вращения блока корневых модулей с растениями не более 10–11 об/мин. Максимальная величина центростремительного ускорения,  $a$ , действующего на растения при выращивании их в оранжерее, определяется формулой:

$$a = 4p^2 n^2 R, \quad (4.3)$$

где  $n$  – угловая скорость вращения блока корневых модулей;  $R$  – радиус вращения точки.

При угловой скорости вращения блока корневых модулей, равной 10 об/ч, и радиусах вращения на посадочной поверхности корневого модуля и под лампами на 10-м шаге конвейера, равных 0,11 и 0,45 м соответственно, максимальные значения центростремительных ускорений в "Фитоцикле" составили:

- на посадочной поверхности –  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ g}$  ;
- под светильником –  $5,1 \cdot 10^{-3} \text{ g}$ , где  $g$  – ускорение свободного падения на Земле.

Поскольку величина порогового ускорения для высших растений находится в диапазоне значений от  $4 \cdot 10^{-4}$  до  $10^{-3} \text{ g}$ , то для полной нейтрализации гравитропических реакций, изменяющих радиальные направления роста растений, скорость вращения оранжереи должна быть близка к нижнему пределу скоростей привода, т.е. около 4 об/ч. Однако для обеспечения устойчивости работы привода вращения скорость вращения "Фитоцикла" желательнее поддерживать на уровне 6–7 об/мин. В ходе экспериментов с листовой горчицей и пекинской капустой было установлено, что при таких скоростях вращения побеги растут вдоль нормалей к цилиндрической посадочной поверхности без периодических изгибов за счет реакций гравитропизма.

Блок освещения и вентиляции состоит из наружного кожуха в форме спирального цилиндра и 13 равномерно распределенных под ним люминесцентных ламп белого света. Направляющая спираль наружного кожуха повторяет в полярных координатах кривую роста зеленных культур в течение вегетации. Над каждой лампой размещен светоотражающий экран из нержавеющей стали. Внутри блока освещения размещен датчик температуры, отключающий освещение при нагреве воздуха внутри блока до температуры, превышающей  $34 \text{ }^\circ\text{C}$ . Электрический жгут для питания блока имеет запас длины и наматывается на кожух при вращении блока. Вращение оранжереи и включение реверса происходят по сигналам концевых выключателей, размещенных на кронштейнах силовой рамы, каждый из которых продублирован концевыми выключателями аварийного выключения вращения вегетационной камеры.

Существенным недостатком блока освещения оранжереи "Фитоцикл" явилась его оснащенность люминесцентными лампами, которые недолговечны и не могут обеспечить достаточную плотность потока фотосинтетически активных фотонов над посевом. В следующей нашей оранжерее – "Фитоцикл СД" – блок освещения изготовлен уже на основе светоизлучающих диодов (рис. 4.9). Все остальные элементы конструкции аналогичны таковым в оранжерее "Фитоцикл". Основные технические характеристики оранжереи "Фитоцикл СД" приведены в табл. 4.4.

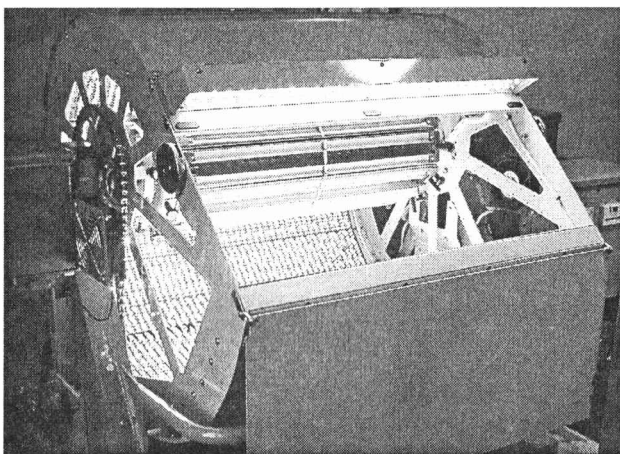


Рис. 4.9. Вегетационная камера оранжереи "Фитоцикл СД" с включенным светодиодным светильником

Таблица 4.4

Основные технические характеристики оранжереи "Фитоцикл СД"

Размеры вегетационной камеры, м:	
длина	0,62
диаметр	0,80
Посадочная площадь, м <sup>2</sup>	0,3
Освещаемая площадь, м <sup>2</sup>	0,86
Объем камеры, м <sup>3</sup>	0,19
Число корневых модулей	10
Источники света	красные ( $\lambda=660$ нм) и синие ( $\lambda=470$ нм) светодиоды
Количество светодиодов, шт:	
красных	6444
синих	1188
Поток фотосинтетических фотонов на расстоянии 3 см от светодиодов, мкмоль/(м <sup>2</sup> ·с)	350 ± 45
Мощность электропотребления, кВт	0,44

Светильник состоит из 15 плоских панелей со светодиодами размерами 595 x 80 мм, установленными на внутренней поверхности спирального цилиндра. На каждой из 12 панелей смонтированы 438 красных и 88 синих светодиода. На трех панелях, соответствующих

начальным шагам конвейера с малым листовым индексом посева, расположены 396 красных и 44 синих светодиода. Блок управления позволяет отдельно включать системы красных и синих светодиодов, а также регулировать для них рабочие токи в пределах от 10 до 35 мА. Измеренная на расстоянии 3 см от источников света суммарная плотность потока фотосинтетически активных фотонов составила  $350 \pm 45$  мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) при токах 25 мА и 23 мА на красных и синих светодиодах соответственно. Электрическая мощность, потребляемая светильником в этом режиме, составила 385 Вт, из которой 285 Вт приходится на красные светодиоды и 95 Вт – на синие. Светодиоды в оранжерее "Фитоцикл СД" расположены на цилиндрической поверхности таким образом, что световой поток увеличивается в направлении оси спирального цилиндра (рис. 4.9).

#### 4.2.2. Краткое техническое описание оранжерей "Витацикл" и "Фитоконвейер"

Описанные выше оранжереи "Фитоцикл" и "Фитоцикл СД" явились прототипами экспериментальных образцов космических конвейерных оранжерей с цилиндрической компоновкой вегетационной камеры, обеспечивающей самораздвижение растений по мере роста. Однако система подачи питательного раствора в корнеобитаемую зону, применяемая в этих оранжереях – "самотеком" по гидрофильному жгуту-фитиллю за счет капиллярного влагопереноса из опущенного относительно блока корневых модулей резервуара – не может быть применена в условиях невесомости. Для космических оранжерей, работающих в условиях невесомости, была предложена система увлажнения и аэрации корнеобитаемой зоны путем реверсивной водоподачи через запорную мембрану, которая и была реализована в оранжереях "Витацикл" и "Фитоконвейер". При этом в оранжерее "Витацикл" посев освещается люминесцентными лампами, а в оранжерее "Фитоконвейер" светильник выполнен из светодиодных панелей.

В техническом решении о начале разработки КОКОР "Витацикл" для выращивания зеленных культур с номинальной среднесуточной производительностью 150 г съедобной биомассы, принятом в 1994 г. в Ракетно-космической корпорации "Энергия", ресурсы, выделенные для оранжереи на борту МКС, составили не более 1,0 кВт мощности электропотребления, не более 860 ккал/ч тепловыделения в кабину и объем не более 1300 x 1200 x 1100 мм (Berkovich et al., 1997c, Berkovich et al., 1998a). В табл. 4.5 приведены расчетные значения суточной продуктивности КОКОР "Витацикл" по основным витаминам (Скурихин, 1984; Попов, Бычков, 1994). Согласно расчетам, номинальная производительность оранжереи позволяла практически полностью удовлетворить потребности экипажа из трех человек в витамине С и каротине и частично – в витаминах В1, В2 и РР.

Таблица 4.5

Суточная продуктивность КОКОР "Витацикл" по витаминам (в числителе: сырая масса, мг; в знаменателе: % от суточной потребности экипажа из трех человек)

Витамины	Капуста листовая	Салат	Кресс-салат	Шпинат	Петрушка	Укроп
С	$\frac{37,5}{19}$	$\frac{45,0}{21}$	$\frac{172,5}{82}$	$\frac{75}{36}$	$\frac{225}{107}$	$\frac{225}{107}$
Каротин	$\frac{3,1}{34}$	$\frac{18,7}{13}$	$\frac{6,0}{67}$	$\frac{22,5}{250}$	$\frac{15}{167}$	$\frac{9,7}{107}$
В1	$\frac{0,09}{4}$	$\frac{0,3}{14}$	$\frac{0,09}{4}$	$\frac{0,16}{7}$	$\frac{0,3}{14}$	$\frac{0,3}{14}$
В2	$\frac{0,045}{1,5}$	$\frac{0,18}{6}$	$\frac{0,2}{7}$	$\frac{0,3}{7}$	$\frac{0,38}{13}$	$\frac{0,15}{5}$
РР	$\frac{0,6}{3}$	-	-	$\frac{0,9}{4}$	$\frac{2,1}{10}$	$\frac{0,9}{4}$

В табл. 4.6 представлены основные технические характеристики КОКОР "Витацикл".

Таблица 4.6

Основные технические параметры оранжереи "Витацикл"

Габаритные размеры, м:	
длина	1,0
диаметр	0,75
Посадочная площадь, м <sup>2</sup>	0,48
Освещаемая площадь, м <sup>2</sup>	1,1
Объем камеры, м <sup>3</sup>	0,32
Число корневых модулей	10
Тип ламп	люминесцентные лампы белого света КЛУ-11
Количество ламп, шт.	52
Поток фотосинтетических фотонов на расстоянии 2 см от ламп, мкмоль/(м <sup>2</sup> ·с)	300÷350
Количество воздуходувок, шт.	2
Мощность электропотребления, кВт	1,0
Объем емкости для питательного раствора, л	20

Установка "Витацикл" состоит из вегетационной камеры с блоком корневых модулей, блока увлажнения и аэрации корневых модулей, системы регулирования параметров газовой среды. Последняя включает блок кондиционирования воздуха с воздуходувкой, холодильником и газожидкостным разделителем, блок охлаждения ламп с воздуходувкой и теплообменником, блок очистки и кондиционирования транспирационной воды с очистными колонками и систему контроля и управления на основе персонального компьютера IBM (рис. 4.10 – 4.12).

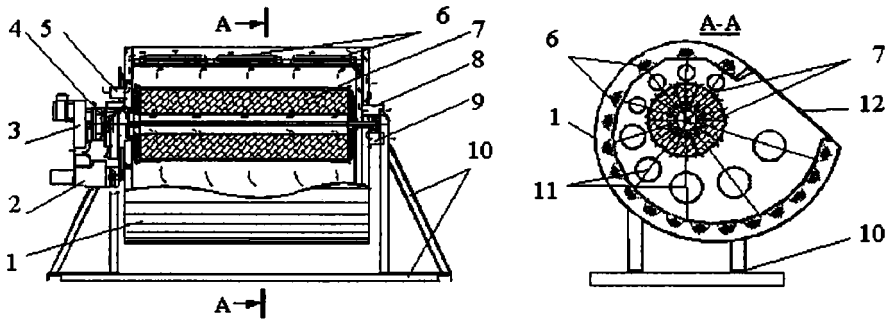


Рис. 4.10. Схема устройства вегетационной камеры "Витацикл". 1 – корпус, 2 – привод вращения, 3 – жидкостной распределитель, 4 – вход контура вентиляции растений, 5 – вход контура охлаждения ламп, 6 – лампы, 7 – корневой модуль, 8 – выход контура вентиляции растений, 9 – выход контура охлаждения ламп, 10 – опорная рама, 11 – иллюминаторы, 12 – люк. Стрелки указывают направление воздушных потоков

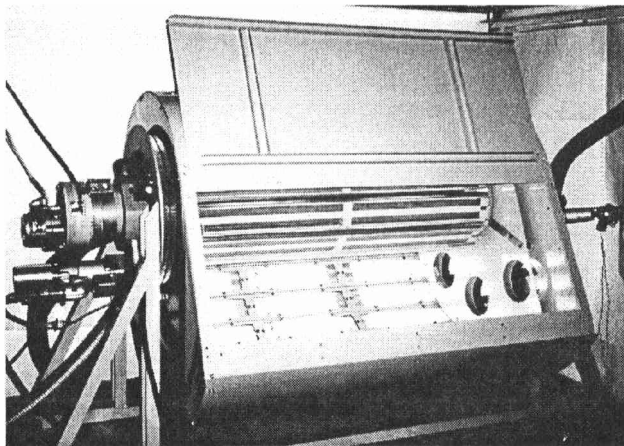


Рис. 4.11. Вегетационная камера оранжереи "Витацикл" с открытым люком

Вегетационная камера оранжереи "Витацикл" изолирована от воздушной среды кабины космического корабля и оборудована герметично закрывающимся люком и застекленными окнами для наблюдения за растениями. Разгерметизация вегетационной камеры предусмотрена только на время уборки урожая и посадки семян. Блок корневых модулей в форме десятигранной призмы установлен горизонтально внутри корпуса вегетационной камеры и соосно с ней. Он состоит из 10 корневых модулей трапециидального сечения длиной 700 мм, шириной большего основания 73 мм и высотой 90 мм. Донные поверхности корневых модулей не доходят до оси вращения блока, образуя в совокупности центральный входной канал-воздуховод, заглушенный с одного торца. Между стенками соседних модулей предусмотрены щелевые зазоры шириной 2–3 мм для прохода воздуха в вегетационную камеру. Корневые модули заполнены гранулированным или волокнистым почвозаменителем и снабжены крышками с четырьмя продольными прорезями для посадочных планок. Порядок работы с растениями в цилиндрической конвейерной оранжерее "Витацикл" практически не отличается от такового в оранжереях "Фитоцикл" и "Фитоцикл СД". Через каждые два месяца непрерывного культивирования растений в оранжерее отработанный почвозаменитель необходимо удалить и заменить на свежий. Отработанный почвозаменитель высушивают в потоке воздуха в специальном блоке.

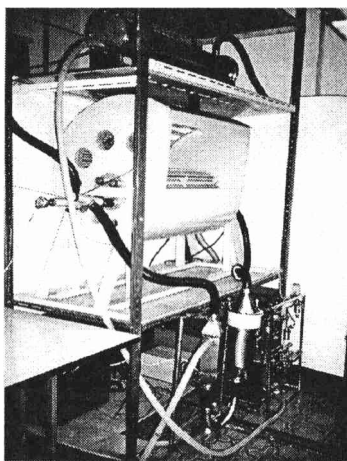


Рис. 4.12. Наземный экспериментальный образец КОКОР "Витацикл" в сборе



Вода поступает в корневые модули через 10-канальный жидкостной распределитель, поочередно соединяющий по заданной программе пористые трубки различных корневых модулей с магистралью подачи и откачки воды. В системе регулирования параметров газовой среды предусмотрены два изолированных контура терморегулирования: для блока освещения и для вегетационной камеры – и специальный регулятор концентрации  $\text{CO}_2$ , контролирующий подачу воздуха из кабины. В блоке охлаждения ламп реализован полностью замкнутый тип системы кондиционирования воздуха, а в вегетационной камере – частично замкнутый, предусматривающий газообмен с кабиной космического корабля для обеспечения растений углекислым газом и удаления выделившегося в процессе фотосинтеза кислорода. Для очистки поступающего из кабины воздуха от летучих соединений, способных негативно повлиять на растения, предусмотрен специальный блок очистки с плазменнокаталитическим фильтром.

Система очистки и кондиционирования транспирационной воды в "Витацикле" включает почти замкнутый контур с подпиткой его водой из бортовой системы орбитальной станции для восполнения потерь воды, содержащейся в срезаемых при уборке растениях. Согласно расчетам, регенерацию воды из вегетационной камеры витаминной оранжереи на борту МКС возможно осуществить с помощью штатной системы СРВ-К, имеющей резерв производительности для очистки дополнительных 10,5 л конденсата транспирационной влаги растений (Berkovich et al, 2000a). Это позволит существенно снизить эквивалентную массу системы водообеспечения орбитальной станции с работающей на борту витаминной оранжереи (рис. 4.13).

Система контроля и управления в "Витацикле" способна обеспечить мониторинг и управление параметрами среды обитания растений, а также сигнализацию и необходимые блокировки сигналов при выходе контролируемых параметров за допустимые пределы (рис. 4.14). В оранжерее принята трехуровневая структура системы контроля и управления: нижний уровень – средства измерения, локальная автоматика, микропроцессорный контроллер, пульт ручного управления и сигнализации; средний уровень – свободно программируемый контроллер; верхний уровень – интеллектуальный терминал. В качестве интеллектуального терминала использован IBM-совместимый персональный компьютер. В табл. 4.7 и 4.8 представлен перечень параметров, измеряемых и регулируемых в оранжерее "Витацикл".

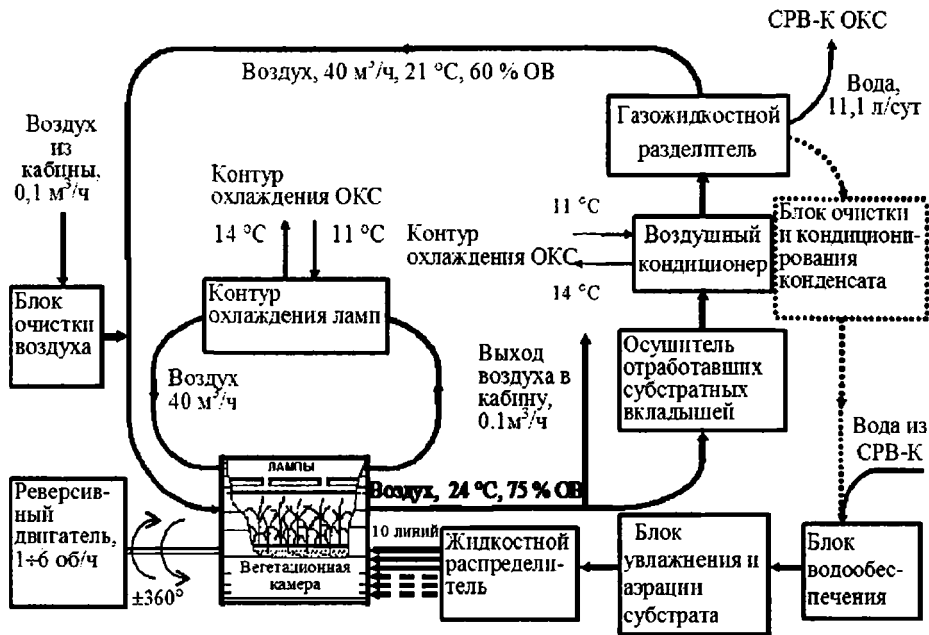


Рис. 4.13. Функциональная схема КОКОР "Витагикл". ОКС – орбитальная космическая станция; ОВ – относительная влажность; СРВ-К – система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги ОКС; ... – обозначение участка схемы, отсутствующего в разомкнутой по воде установке

Таблица 4.7

Перечень параметров, измеряемых в наземном экспериментальном образце оранжереи "Витацикл"

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Диапазон измерения	Допустимая погрешность
1	Температура воздуха на выходе из блока освещения	°С	0–80	±0,5
2	Температура воздуха на входе и выходе вегетационной камеры	°С	0–50	±0,5
3	Температура теплоносителя на входе и выходе теплообменников в контурах терморегулирования	°С	0–20	±0,5
4	Температура воздуха на входе и выходе конденсатора транспирационной влаги	°С	0–50	±0,5
5	Относительная влажность воздуха на входе и выходе вегетационной камеры	%	50 – 95	±5,0
6	Давление воздуха в вегетационной камеры	кПа	90 – 110	±5,0
7	Объемная концентрация CO <sub>2</sub> в воздухе вегетационной камеры	% об.	0–0,5	±0,02
8	Парциальное давление O <sub>2</sub> в воздухе вегетационной камеры	кПа	20–25	±0,5
9	Объем дозы воды, подаваемой и откачиваемой из корневого модуля	мл	15	±1,5

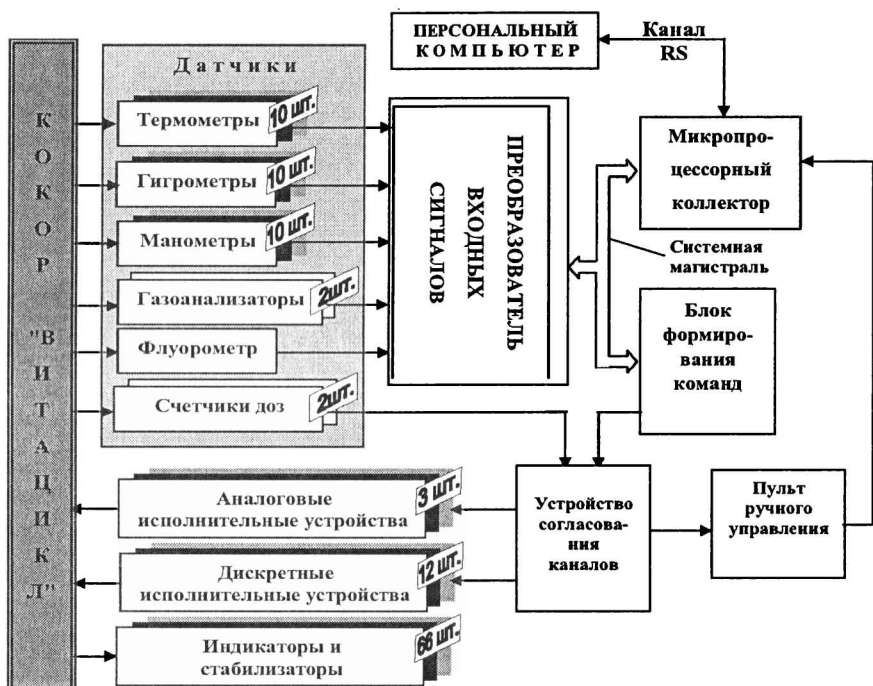


Рис. 4.14. Структурная схема системы управления КОКОР "Витацкл"

Таблица 4.8

Перечень параметров, автоматически регулируемых в наземном экспериментальном образце оранжереи "Витацкл"

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Диапазон регулирования	Точность
1	Температура воздуха на выходе из вегетационной камеры	°С	22–26	±1,5
2	Относительная влажность воздуха на выходе из вегетационной камеры	%	60–80	±7
3	Содержание CO <sub>2</sub> в воздухе вегетационной камеры	% об.	0,1–0,2	±0,02
4	Водный потенциал в пористых трубках корневых модулей	кПа	-1,0– -3,0	±0,2
5	Температура воздуха на выходе блока освещения	°С	55–65	±2

Таким образом, конструкция оранжереи "Витацкл" предусматривает независимость ее работоспособности на борту орбитальной станции от систем водообеспечения и регулирования газового состава станции благодаря автономному режиму ее

функционирования; более того, функционирующая оранжерея обеспечивает дополнительную очистку воздуха от газовых загрязнителей и обогащает воздух кислородом. При этом ресурсы бортовой системы терморегулирования практически не подвержены дополнительной нагрузке. Кроме того, конструкция оранжереи обеспечивает удобство проведения в условиях космического полета всех технологических операций: уборки и посадки растений, замены почвозаменителя, технического обслуживания и ремонта, а также максимальную унификацию блоков кондиционирования воды и воздуха с соответствующими блоками бортовых систем жизнеобеспечения и возможность транспортировки всех блоков оранжереи в собранном состоянии через люки модулей МКС.

Однако в 2001 г. на основании результатов анализа доступных в ближайшем будущем ресурсов на борту российского сегмента МКС был сделан вывод, что запланированное ранее энергообеспечение на оранжерею "Витацикл" не может быть выделено в полном объеме. В связи с этим в 2002 г. был создан прототип производственной витаминной космической оранжереи "Фитоконвейер", при разработке которого были оптимизированы технологические параметры, рабочие режимы и размеры корневого модуля (табл. 4.9).

Таблица 4.9

## Характеристики экспериментального образца космической оранжереи "Фитоконвейер"

Габаритные размеры, мм	540x590x400
Потребляемая электрическая мощность, кВт	0,25
Объем оранжереи, м <sup>3</sup>	0,1
Суммарная освещаемая площадь посева, м <sup>2</sup>	0,4
Количество шагов растительного конвейера	6
Плотность потока фотосинтетически активных фотонов под светильником, мкмоль/м <sup>2</sup> ·с	350
Номинальная производительность салатной зелени, г/сут	40
Временной интервал между шагами конвейера, сут	5

Оранжерея "Фитоконвейер" во многом аналогична оранжерее "Витацикл": возможность организации конвейерного посева, цилиндрическая компоновка вегетационной камеры, реверсивная система корневого снабжения, применение красных и синих светодиодов в блоке освещения в качестве источника света. Существенные изменения внесены в конструкцию блока корневых модулей, а также значительно расширены функции системы контроля и управления. В "Фитоконвейере" уменьшено число корневых модулей с 10 до 6, вдвое по сравнению с "Витациклом" уменьшена длина корневого модуля и до 4–5 суток увеличена длительность шага конвейера. "Фитоконвейер" оборудован цилиндрическими корневыми

модулями, представляющими собой валики из волокнистого ионообменного соленасыщенного почвозаменителя с расположенными внутри гидрофильными мелкопористыми трубками.

Блок освещения оранжереи "Фитоконвейер" аналогичен блоку освещения оранжереи "Фитоцикл СД", отличается от него в основном геометрическими размерами. Источниками света в "Фитоконвейере" являются светодиоды с излучением в красной ( $\lambda = 660$  нм) и синей ( $\lambda = 470$  нм) областях спектра, при этом синяя компонента излучения составляет примерно 10 % от суммарной плотности потока фотонов. Плотность потока фотонов под светильником на расстоянии 4 см от светодиодов составляет  $150$  мкмоль/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) на 1–2 шагах и  $350$  мкмоль/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) и 4–6 шагах конвейерного посева соответственно. Кроме того, блок освещения оранжереи "Фитоконвейер" снабжен панелью белых светодиодов, обеспечивающей подсветку растений белым светом при открытии люка и, следовательно, визуальное восприятие окраски листьев как зеленой.

#### 4.2.3. Результаты наземных опытов с растениями в цилиндрических конвейерных оранжереях "Фитоцикл" и "Фитоцикл СД"

Начиная с середины 90-х годов в ИМБП проводятся опыты по обработке технологии культивирования листовых культур в наземных цилиндрических конвейерных оранжереях с использованием различных искусственных заменителей почвы. В частности, растения выращивали на гранулированных ("Балканин", "БИОНА-312") и волокнистых ("БИОНА-В3") соленасыщенных ионообменных почвозаменителях, а также при подаче питательного раствора в химически инертные почвозаменители (перлит). На рис. 4.15 представлен внешний вид вегетационной камеры оранжереи "Фитоцикл" с конвейерным посевом пекинской капусты в одном из опытов, а в табл. 4.10 и 4.11 приведены данные по производительности оранжереи "Фитоцикл" в длительных экспериментах с листовыми культурами.

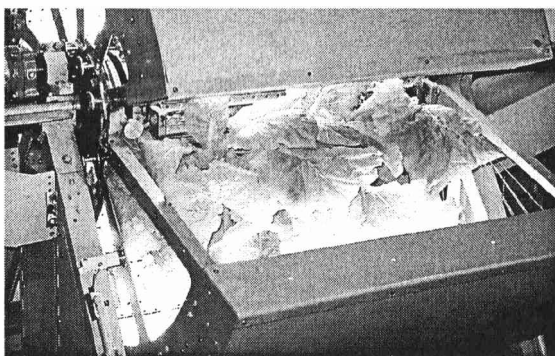


Рис. 4.15. Вегетационная камера оранжереи "Фитоцикл" с конвейерным посевом пекинской капусты

Таблица 4.10

Производительность оранжерей "Фитоцикл" в различных вегетационных экспериментах

Культура	Длительность опыта, сут.	Длительность шага конвейера, сут.	Фото период, ч	Источник минерального питания	Средняя урожайность с одного шага конвейера, г сырой массы	Максимальная урожайность с одного шага конвейера, г сырой массы
Капуста листовая	48	3	12	"Балканин"	280	420
Капуста листовая	21	3	12	Раствор Чеснокова	-	665
Горчица листовая	36	4	16	"БИОНА-312"	360	700*
Горчица листовая	18	4	16	Раствор Чеснокова	-	780*
Капуста листовая	56	3	24	Раствор Чеснокова	159	1300*

\* Урожай в оранжерее получен при первой уборке растений, выросших при отсутствии затенения от посевов соседних шагов конвейерного посева.

Таблица 4.11

Морфометрические показатели 30-дневных растений пекинской капусты в оранжерее

"Фитоцикл"

Уборка растений, №	Сырая съедобная масса посева, г	Сырая съедобная масса побега, г	Доля съедобной части в сырой массе побега, %	Доля сухих веществ в побегах, %	Высота побега, см	Максимальная высота побега, см
1	137	11,4±4,1	99±1	7±1	16±2	21
2	104	8,7±3,4	98±1	7±1	14±2	20
3	136	11,3±7,1	96±2	12±6	13±3	23
4	202	16,8±8,8	95±1	6±1	15±3	22
5	272	22,7±15,4	95±2	7±1	17±3	23
6	156	13,0±6,4	96±2	8±2	14±2	21
7	142	11,8±8,7	98±1	8±1	14±3	22
8	128	10,7±4,4	97±1	8±1	14±2	20
9	155	12,9±6,8	97±1	9±2	15±2	23
Среднее значение	159±33	13,3±2,7	97±1	8±1	15±1	23±1

Невысокий, не более 130 мкмоль/(м<sup>2</sup>·с), уровень плотности потока фотосинтетически активных фотонов в данной оранжерее явился причиной значительного колебания

урожайности по шагам конвейера, так как, чем более развиты были растения в посеве, тем сильнее они затеняли растения на последующем шаге конвейера, что при данном уровне облученности значительно снижало их урожайность. По этой же причине первый урожай в оранжеере значительно превышал последующие, так как растения в первом корневом модуле, будучи незатененными растениями предыдущего и последующего посевов, получали дополнительное количество световой энергии. Тем не менее удельная продуктивность оранжеери, оцениваемая по компромиссному критерию оптимальности светового режима в оранжеере, была достаточно высокой (табл. 4.12).

Таблица 4.12

Значения компромиссного критерия оптимальности светового режима в конвейерном посеве оранжеери "Фитоцикл"

Уборка растений, №	Площадь освещаемой поверхности, м <sup>2</sup>	Сухая масса посева, г	Средний прирост сухой массы посева, г/ч	Доза световой энергии, падающей на посев, кВт·ч	Компромиссный критерий <sup>1)</sup> , ×10 <sup>-5</sup>
1	0,85	9,59	0,0133	7,13	2,91
2	0,85	7,28	0,0100	7,13	1,65
3	0,85	16,32	0,0225	7,13	8,35
4	0,85	12,12	0,0167	7,13	4,60
5	0,85	19,04	0,0263	7,13	11,41
6	0,85	12,48	0,0175	7,13	5,05
7	0,85	11,36	0,0158	7,13	4,11
8	0,85	10,24	0,0142	7,13	3,32
9	0,85	13,95	0,0196	7,13	6,33
Среднее значение	0,85	12,49 ± 2,33	0,017 ± 0,003	7,13	5,30 ± 1,97

<sup>1)</sup> Показатель рассчитывается как произведение продуктивности посева по шагам конвейера на удельную продуктивность посева на единицу падающей энергии ФАР.

Максимальное значение удельной производительности оранжеери "Фитоцикл" по сырой съедобной биомассе пекинской капусты в стационарном режиме работы составило:

- на единицу потребляемой установкой энергии – 0,053 кг/кВт·ч;
- на единицу объема – 0,8 кг/(м<sup>3</sup>сут).



Для сравнения рассчитаем такие же удельные характеристики для самой экономичной из описанных в литературе наземных конвейерных зеленых оранжерей под названием "Самород-Арктика", созданной в 80-е годы в ИМБП под руководством В.Н.Головина (Адамович, Горшенин, 1997; Чучкин и др., 1983). При установочной мощности 0,5 кВт, 18-часовом фотопериоде, посадочной площади  $1 \text{ м}^2$  и объеме около  $0,9 \text{ м}^3$  продуктивность листовой капусты в этой установке составила 400 г сырой массы/сутки. Рассчитанная удельная производительность оранжереи "Самород-Арктика" по полезной сырой биомассе капусты листовой в стационарном режиме работы была равна:

- на единицу потребляемой установкой энергии –  $0,04 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}$ ;
- на единицу объема –  $0,44 \text{ кг}/(\text{м}^3\text{сут})$ .

Таким образом, самораздвигающийся посев растений на цилиндрической посадочной поверхности в оранжерее "Фитоцикл" обеспечил повышение удельной производительности оранжереи на единицу потребляемой энергии приблизительно на 30 %, а на единицу объема – почти вдвое по сравнению с посевом растений в оранжерее с плоской посадочной поверхностью.

Вторая цилиндрическая конвейерная оранжерея, "Фитоцикл-СД", в отличие от предыдущей, оснащена светильником на основе красных и синих светодиодов, обеспечивающем более высокую, до  $350 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ , плотность потока фотосинтетически активных фотонов. В этой оранжерее листовые культуры выращивали как в монопосевах (корневой модуль засеян семенами какой-либо одной культуры), так и в смешанных посевах (корневой модуль засеян семенами нескольких культур). Объектами опытов явились пекинская капуста, сорт Хибинская, и два сорта китайской капусты: Ласточка (сортотип пак-чой) и Веснянка (сортотип пе-тсай). В оранжерее "Фитоцикл-СД" растения выращивали на волокнистом соленасыщенном ионообменном почвозаменителе; в некоторых опытах в качестве минеральной добавки к солям, содержащимся в почвозаменителе, использовали медленно действующее удобрение "Осмокот", которое вносили одновременно во все корневые модули перед запуском оранжереи, или питательный раствор Чеснокова в дозе 0,5 нормы. Длительность непрерывного культивирования растений в оранжерее составила в разных экспериментах от 36 до 90 сут. В табл. 4.13 представлены данные по возрастной динамике массы побегов и биохимического состава листьев растений, выращенных на ионообменном почвозаменителе с добавлением медленно действующих удобрений. Как видно из приведенных данных, продуктивность посева как по съедобной биомассе, так и по количеству витаминов, получаемых с посева, была максимальной у 30-дневных растений, при этом увеличение исследованных параметров было практически линейным, что подтвердило правильность выбора длительности вегетации. Содержание нитратов в листьях в съемом

возрасте было ниже предельно допустимого количества (ПДК для нитратов составляет 200 и 300 мг на каждые 100 г сырой массы для открытого и защищенного грунта соответственно). Таким образом, медленно действующие удобрения могут успешно применяться в качестве минеральной добавки при культивировании растений на ионообменном соленасыщенном почвозаменителе, не вызывая ухудшения качества продукции.

Таблица 4.13

Продуктивность и биохимический состав растений пекинской капусты в оранжерее "Фитоцикл СД" в зависимости от возраста

Показатели растений	Возраст растений, сут (шаг конвейера, №)							
	9 (III)	12 (IV)	15 (V)	18 (VI)	21 (VII)	24 (VIII)	27 (IX)	30 (X)
Сырая съедобная масса посева, г	0,6	3,2	12,6	54	134	201	371	650
Кхоз, %	71±7	90±1	88±5	93±2	96±1	95±2	94±2	93±4
Высота побега, см	4±1	6±1	6±2	12±3	13±2	14±5	18±4	17±4
Содержание сухих веществ в побегах, %	7,3	7,2	7,0	6,9	7,4	7,3	6,2	5,5
Аскорбиновая кислота, мг/посев	-	-	-	79	142	195	-	546
Каротин, мг/посев	-	-	-	7,8	15,5	22,1	41,2	68,3
Клетчатка, г/посев	-	-	-	5,2	9,9	19,3	53	37
Нитраты, мг/100 г сырой массы	-	-	-	120	140	390	80	190

В табл. 4.14 и 4.15 представлены данные по продуктивности и биохимическому составу листовых культур, выращенных в "Фитоцикле СД" при работе оранжереи в стационарном режиме.

Таблица 4.14

Продуктивность и биохимический состав посевов пекинской капусты, выращенных в конвейерной оранжерее "Фитоцикл СД" в течение первого оборота конвейера

Среднее число растений в посеве, шт.	7±2
Средняя съедобная масса посева, г	474±150
Кхоз, %	94±3
Содержание сухих веществ, %	6±1
Аскорбиновая кислота, мг/100 г сырой массы	398±91
Каротин, мг/100 г сырой массы	49,8±10,6
Клетчатка, г/100 г сырой массы	27,0±5,8

Таблица 4.15

Продуктивность и биохимический состав зеленных культур, выращенных в конвейерной оранжерее "Фитоцикл СД" в течение второго оборота оранжерей

Показатели	Пекинская капуста, сорт Хибинская	Китайская капуста, сорт Ласточка	Китайская капуста, сорт Веснянка	Смешанный посев
	Среднее число растений в посеве, шт.	9±4	14±5	
Продуктивность, г/посев	360±120	83±42	369±29	435±130
Кхоз, %	96±2	96±1	93±1	96±1
Содержание сухих веществ, %	6,8±1,2	8,0±0,2	7,1±0,5	6,7±0,3
Аскорбиновая кислота, мг/посев	500±167	91±46	391±31	513±123
Каротин, мг/посев	51±17	22±11	76±6	83±17
Клетчатка, г/посев	220±73	54±21	218±17	263±58

Продуктивность пекинской капусты в 30-дневном возрасте в течение второго оборота конвейера была на 27 % ниже, чем в течение первого оборота. Причиной этого явилось, вероятно, уменьшение плотности потока фотосинтетически активных фотонов с 340 до 220 мкмоль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Вместе с тем не было отмечено снижения в содержании витаминов и балластных веществ в получаемой продукции. Проведенные эксперименты

продемонстрировали возможность одновременного выращивания разных культур в оранжерее и даже в одном корневом модуле. Более того, практически все показатели смешанного посева были выше по сравнению с монопосевами исследованных культур (табл. 4.16).

Таблица 4.16

Сравнительная оценка продуктивности листовых культур в смешанном и монопосевах в расчете на 0,1 м длины корневого модуля

Показатели	Посев	Пекинская	Китайская	Китайская
		капуста, сорт Хибинская	капуста, сорт Ласточка	капуста, сорт Веснянка
Сырая съедобная масса, г/посев	монопосев	80±26	18±9	82±6
	смешанный посев	108±76	33±20	150±40
Аскорбиновая кислота, мг/посев	монопосев	111±37	20±10	87±7
	смешанный посев	141±36	39±9	165±39
Каротин, мг/посев	монопосев	11±4	5±2	17±1
	смешанный посев	15±3	9±2	31±6
Клетчатка, г/посев	монопосев	49±16	12±5	48±4
	смешанный посев	61±14	23±5	91±20

Среди выбранных культур наилучшие показатели были у китайской капусты, сорт Веснянка. Пекинская капуста, сорт Хибинская, была близка к ней по продуктивности и биохимическим показателям, а показатели китайской капусты, сорт Ласточка, были значительно ниже, что объясняется ее позднеспелостью. Данные по вкладу отдельных культур в продуктивность смешанного посева представлены в табл. 4.17.

Таблица 4.17

Вклад отдельных культур в продуктивность смешанного посева, %

Показатели	Пекинская капуста, сорт Хибинская	Китайская капуста, сорт Ласточка	Китайская капуста, сорт Веснянка
Сырая съедобная масса	35	12	53
Аскорбиновая кислота	41	11	48
Каротин	27	17	56
Клетчатка	35	13	52

Согласно расчетам, проведенным для многовидового посева, выращивание растений в оранжерее "Фитоцикл СД" позволяет значительно улучшить рацион экипажей пилотируемых космических объектов (табл. 4.18).

Таблица 4.18

Продуктивность оранжереи "Фитоцикл СД" по витаминам и балластным веществам

Показатели	Аскорбиновая кислота, мг/посев	Каротин, мг/посев	Клетчатка, г/посев
Доля от суточной потребности экипажа из 3 человек в полете, %	57	153*	83
Доля от суточной потребности экипажа из 2 человек на завершающем этапе полета, %	29	77*	83

\* Доля от суточной потребности экипажа рассчитана с учетом ретинолового эквивалента, учитывающего сумму ретинола в продукте и ретинола, образующегося в организме из  $\beta$ -каротина.

При выращивании растений на ионообменном соленасыщенном почвозаменителе в сочетании с питательным раствором содержание нитратов в листьях в течение первого оборота конвейера не превышало ПДК для листовых овощей в защищенном грунте. В течение второго оборота конвейера содержание нитратов в листьях превысило ПДК в 3–4 раза. Таким образом, данный способ минерального питания при выращивании растений в "Фитоцикле СД" может быть применен только при условии постоянного мониторинга и своевременной коррекции концентраций солей в подаваемом растворе и растворе в почвозаменителе.

В опытах по выращиванию пекинской капусты в установке "Фитоцикл СД" была получена средняя продуктивность, равная  $(215 \pm 17)$  г/сут, при этом значение Q-критерия составило  $7,5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Отметим, что указанная производительность космической оранжереи могла бы удовлетворить ежедневные потребности 3 членов космического экипажа в витаминах А и С, а также в грубых пищевых волокнах. Интересно было бы сравнить по Q-критерию оранжерею "Фитоцикл СД" с другими космическими оранжереями для производства салатной зелени, однако в настоящее время нет публикаций с достаточными для расчета экспериментальными данными. Вследствие этого мы оценили Q-критерий для исследовательской космической оранжереи "Свет", работавшей с 1990 по 2000 г.

на ОК "Мир" при культивировании в ней того же сорта пекинской капусты, что и в наших опытах. Средняя производительность пекинской капусты, сорт Хибинская, за 34-суточную вегетацию при круглосуточном освещении составила 413 г сырой биомассы (Левинских и др., 2001). Принимая во внимание, что объем вегетационного блока оранжереи "Свет" без вспомогательных блоков составил около  $0,07 \text{ м}^3$ , а электропотребление было равно 200 Вт, значение Q-критерия при средней величине урожая оказалось равным  $0,22 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Таким образом, для получения средней производительности по витаминной зелени, равной 215 г в сутки, как у "Фитоцикла СД", пришлось бы установить около 18 оранжерей "Свет" с общим объемом около  $1,3 \text{ м}^3$ , при этом производительность на единицу затраченных ресурсов была бы ниже более чем в 30 раз. Разумеется, сравнивать эффективность специально разработанной для производства биомассы растений оранжереи с исследовательской оранжереей "Свет" не совсем корректно. Мы привели такое сравнение лишь для иллюстрации того факта, что задача производства на борту пилотируемых космических аппаратов растительной биомассы для обогащения рациона питания экипажей требует принципиально новых технологических решений, значительно увеличивающих удельную продуктивность посевов, и что применение существующих исследовательских оранжерей для производственных целей неэффективно.

#### **4.3. Проекты производственных оранжерей для марсианской экспедиции и будущих планетных баз**

В главе 1 мы отметили, что в начале 1990-х годов в США были развернуты работы, направленные на создание производственных космических оранжерей для перспективных космических экспедиций. Предложен ряд проектов оранжерей для баз на поверхности Марса или Луны. Можно выделить два класса предлагаемых сооружений: оранжереи внутри жилого сооружения для экипажа и расположенные снаружи от него.

К типичному образцу 1-го класса можно отнести уже упоминавшуюся в главе 1 систему производства биомассы из проекта BIO-Plex (Barta, Castillo, 2001). Для наглядности на рис. 4.16 воспроизведен интерьер в такой оранжерее, взятый из рекламного проспекта.

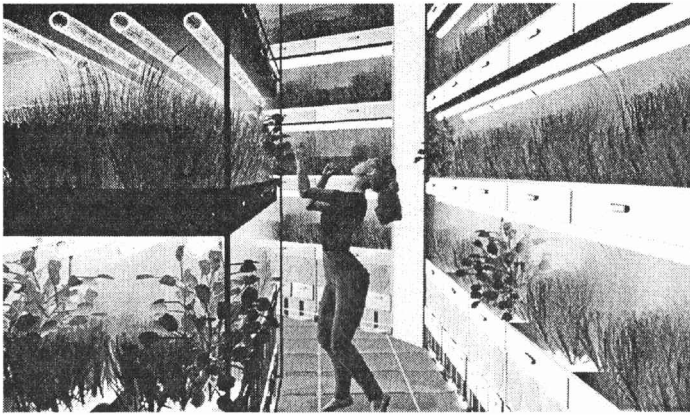


Рис. 4.16. Интерьер в оранжерее внутри космического жилища (Barta, Castillo, 2001)

Приведем здесь техническое описание системы по производству биомассы внутри комплекса ВЮ-Рлех. Система объединяет в единое помещение цилиндрической формы отсеки: жилую камеру, блок систем жизнеобеспечения, сантехнический модуль, лабораторное помещение, две камеры для производства растительной биомассы и воздушно-шлюзовую камеру. Перечисленные отсеки расположены по обе стороны центрального соединительного коридора, в котором размещены вспомогательные установки: растительная камера для приготовления рассады, посадочная и уборочная машины, сушильная установка для растительных отходов и др. Внутри каждой камеры для производства растительной биомассы вдоль цилиндрического отсека расположены стеллажи с посадочными ваннами в три ряда с двумя проходами. Суммарная посадочная площадь каждой камеры составляла около  $80 \text{ м}^2$ . На стеллажах в 3 или 4 яруса расположены посадочные ванны для гидропонного выращивания растений, частично бессубстратного, а частично с субстратом из высушенных растительных отходов. В процессе испытаний такой системы, проведенных в Космическом центре им. Джонсона НАСА, выращивали 8 видов растений для потребления в свежем виде: томаты, морковь, капусту, шпинат, мангольд, салат, редис, лук и 7 видов для приготовления основного питания: пшеницу, картофель, сладкий картофель, сою, бобы, земляной орех и рис. По результатам экспериментов в камерах для производства растительной биомассы авторы рекомендовали конвейерную структуру посевов, по крайней мере для зеленных культур. В табл. 4.19 указаны параметры среды обитания в камерах для производства растительной биомассы по данным работы (Barta, Castillo, 2001).

Параметры среды в камерах для производства растительной биомассы  
в модели марсианского комплекса BIO-Plex

Параметры	Диапазоны значений
парциальное давление O <sub>2</sub> , кПа	19,5-23,8
парциальное давление CO <sub>2</sub> , кПа	0,01-1,0
Полное давление газовой среды, кПа	100-103
Температура воздуха, °C, в световой период	16-35
в темновой период	15-25
Относительная влажность, %	50-85
Скорость воздушных потоков, м/с	0,1-1,0
Плотность потока фотонов, мкмоль·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup> в световой период	200-1500
в темновой период	0,5
Фотопериод, ч/сут	0-24

Авторы проекта отмечают следующие основные нерешенные проблемы в подобных системах:

- Механизация уборки и транспортировки корнеплодных культур;
- Удовлетворение требований одновременно по температуре воздуха и скорости воздушных потоков в зоне размещения растений при строгих ограничениях на диаметры и объемы воздухопроводов и теплообменников;
- Удовлетворение требований по равномерности светового потока при близком расположении ламп над посевами;
- Эффективное управление характеристиками питательного раствора при совместном выращивании овощных культур, потребляемых в свежем виде;
- Монтаж вспомогательных систем и оборудования внутри камер без снижения посадочных площадей;
- Отсутствие надежного отработанного оборудования для контроля питательного раствора, освещения посевов, посадки и уборки урожая, обработки семян и т.д.;
- Разработка технологии приготовления нетоксичного и долговечного корневого субстрата из растительных отходов.



Отметим, что большинство из перечисленных проблем стоят и при проектировании наземных фитотронов и закрытых оранжерей, хотя и не так остро, как для космического применения. Именно эти проблемы приводили к возрастанию затрат времени на обслуживание сельскохозяйственного блока в установке "Биосфера 2" до 45 % от всего времени экипажа (Silverstone, Nelson, 1996).

Одной из мер по снижению трудоемкости операций в космических оранжереях с достаточно большими посадочными площадями может стать организация конвейерного производства растительной продукции по ротационному принципу. Подобная организация технологического процесса обеспечила когда-то резкий скачок производительности труда на машиностроительных конвейерах. В случае космических оранжерей при такой структуре посева посадка и уборка растений осуществляются на одном и том же рабочем месте, которое легче механизировать. Отпадает также необходимость транспортировки посадочного материала и урожая в пределах оранжереи из разных ее пунктов. Особенно удобно организовать ротационный растительный конвейер в описанных нами в главе 5 цилиндрических, тороидальных и сферических оранжереях, что является их несомненным преимуществом при применении на планетных базах.

Конструкции оранжерей, располагаемых снаружи жилых отсеков, описаны, например, в статьях (Clawson et al., 1999; Bucklin et al., 2001). В обоих случаях было предложено использовать надувные конструкции оранжерей, имеющие целый ряд преимуществ: меньший вес, удобство доставки в ненадутом состоянии, быстрота и простота монтажа. В первой из этих статей предлагалось формировать оранжереи с потребной производительностью и видовым составом из необходимого количества надувных модулей ("автономных оранжерей-гондол" – Autonomus Garden Pods. Конфигурация подобной системы на поверхности Марса дана на рис. 4.17, взятом из упомянутой статьи.

Авторы привели пример оранжереи-гондолы с массой в пределах 100–125 кг, диаметром 0,9 м и длиной около 1,85 м, в которой можно культивировать посевы на выпуклой цилиндрической поверхности, при этом освещаемая поверхность посева составляет около 2,7 м<sup>2</sup>. Модульная конструкция придает такой оранжерее гибкость в применении, т.к. в модулях можно размещать посевы различных растений, поддерживать разные условия среды и т.д. Важным преимуществом является высокая надежность из-за естественного для нее резервирования элементов. Такие оранжереи могли бы использовать комбинацию искусственного и естественного света (через иллюминаторы). Подобная система могла бы заполнить нишу между малыми исследовательскими космическими оранжереями и большими производственными вегетационными установками типа ВЮ-Плех.

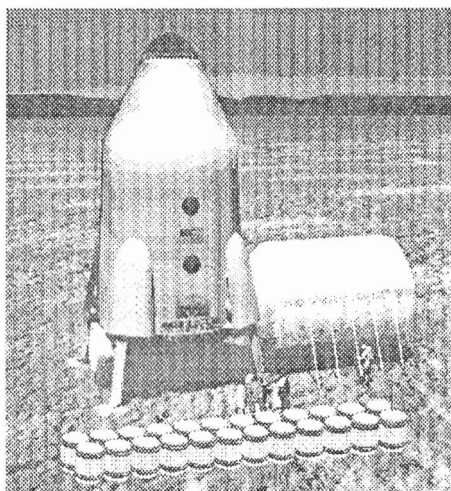


Рис. 4.17. Компоновка автономных оранжерей-гондол на поверхности Марса  
(Clawson et al., 1999)

В работе (Bucklin et al., 2001) предлагается концепция выносных полусферических надувных оранжерей с пониженным давлением газов (воздух без азота с пониженным содержанием кислорода). Построена небольшая наземная модель такой оранжереи и описаны первые опыты по выращиванию зеленых культур. Однако эти оранжереи не снабжены никакими средствами автоматизации производственных операций и могут рассматриваться лишь как концептуальные модели.

В качестве концептуальной модели оранжерей для планетных баз можно предложить тороидальные установки больших размеров (радиусы направляющей в несколько метров), которые легко вписываются в отсеки планетных баз и транспортных кораблей цилиндрической и сферической формы. Как будет показано в главе 5, такие конструкции оранжерей могли бы дать большую экономию всех расходуемых ресурсов: массы, занимаемого объема, энергии и трудозатрат экипажа. В настоящее время российские исследователи прорабатывают подобную конструкцию для марсианской экспедиции.

В целом, для создания реальных конструкций оранжерей для марсианской экспедиции нужно провести значительный объем дополнительных исследований, в том числе и в условиях космических полетов. Вот почему в настоящее время крайне важно увеличить количество опытов по отработке конструкций и технологий для культивирования растений на Международной космической станции.

## ГЛАВА 5. ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКИХ ОРАНЖЕРЕЙ ЗА СЧЕТ ОРГАНИЗАЦИИ САМОРАЗДВИГАЮЩИХСЯ ПОСЕВОВ РАСТЕНИЙ НА ВЫПУКЛЫХ ПОСАДОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Экспериментальное сравнение эффективности разработанных с российским участием космических оранжерей с различными компоновками, описанных в главе 4, показало, что временная и пространственная организация посевов растений может существенно влиять на их удельную производительность на единицу затраченных ресурсов. В данной главе мы приводим сравнительный анализ основных объемных и энергетических характеристик космических вегетационных устройств с плоскими и криволинейными посадочными поверхностями, а также оцениваем повышение продуктивности растений в космических оранжереях с выпуклой цилиндрической посадочной поверхностью с использованием методов компьютерного моделирования.

Известные конструкции исследовательских космических оранжерей, приведенные нами в табл. 1.1 в главе 1, в основном повторяют компоновку наземных вегетационных устройств: растения растут на плоской посадочной поверхности, над которой расположены источники света (рис. 5.1 А). Стебли растений в посевах на таких поверхностях параллельны. Такая компоновка в наземных условиях обусловлена существованием преимущественного направления ориентации растений, заданного вектором силы тяжести и отслеживаемого ими с помощью гравитропических реакций. Многочисленные опыты по культивированию растений в условиях космического полета показали, что при отсутствии силы тяжести стебли растений могут ориентироваться по градиенту светового потока за счет реакций фототропизма. Следовательно, задавая в условиях невесомости с помощью светотехнических устройств световое поле с различными пространственными характеристиками вблизи посадочной поверхности, можно получать посевы растений с различными направлениями стеблей в пространстве. В частности, мы предложили размещать посевы растений в космических оранжереях на выпуклых посадочных поверхностях, а источники света, освещающие посев, равномерно распределить на вогнутой криволинейной поверхности той же формы, что и посадочная, но внешней, концентрической и/или коаксиальной по отношению к выпуклой посадочной (рис. 5.1 Б). Как показали опыты, при отсутствии силы тяжести в таких установках побеги стеблевых растений в посеве ориентируются вдоль нормалей к посадочной поверхности за счет фототропических реакций (Berkovich et al., 1997c). Поскольку нормали к различным точкам выпуклых поверхностей не являются параллельными, направления роста побегов в таких посевах

являются расходящимися, т.е. расстояния между верхушками побегов по мере их роста увеличиваются. Таким образом происходит самораздвижение растений в посеве и, как будет показано ниже, уменьшается взаимное затенение листьев и улучшается светораспределение в посеве.

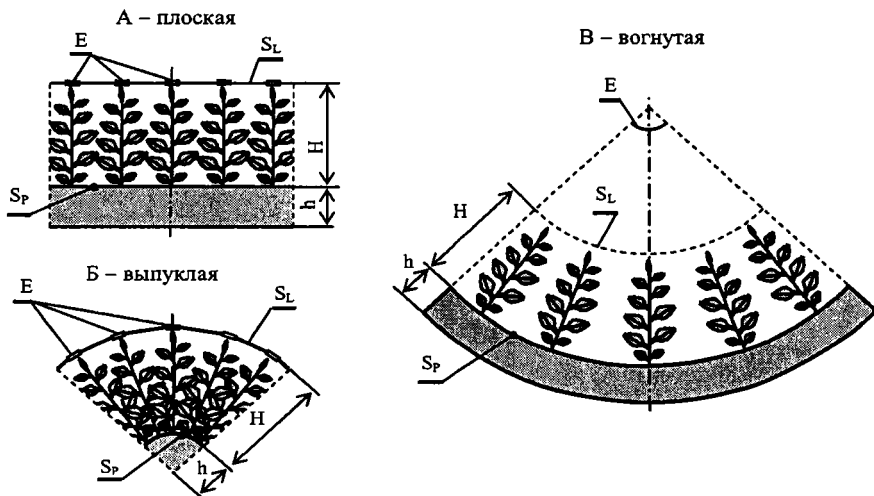


Рис. 5.1. Основные типы компоновок вегетационных камер космических оранжерей.

Е – источник света;  $S_p$  – посадочная поверхность посева;  $S_L$  – освещаемая поверхность посева;  $H$  – высота растений;  $h$  – высота корнеобитаемой зоны

Принимая во внимание этот эффект, был предложен ряд принципиально новых компоновок оранжерей для условий микрогравитации: со сферической посадочной поверхностью (Беркович и др., 1979б; Беркович и др., 1982а; Беркович и др., 1982б), цилиндрической (Беркович и др., 1979а; Беркович и Павловский, 1997) и тороидальной (Беркович и др., 1990). Возможна также компоновка космической оранжереи с вогнутой посадочной поверхностью (рис. 5.1 В). Примером последнего варианта компоновки может служить вращающаяся цилиндрическая оранжерея, разработанная в конце 70-х годов д-ром Мерлом Дженсеном (Merle Jensen) из Университета штата Аризона, США (Броди, 1980), которая изображена на рис. 5.2. В этой конструкции трубчатая лампа была расположена

вдоль продольной оси вращающейся цилиндрической вегетационной камеры, на внутренней поверхности которой были посажены растения. При вращении цилиндрической камеры с растениями на них воздействовали центробежные силы, и растения росли вдоль радиусов цилиндрической поверхности по направлению к лампе под совместным влиянием гравитропических и фототропических реакций. В такой конструкции стебли растений по мере их роста сближались, загущая верхние ярусы листьев.

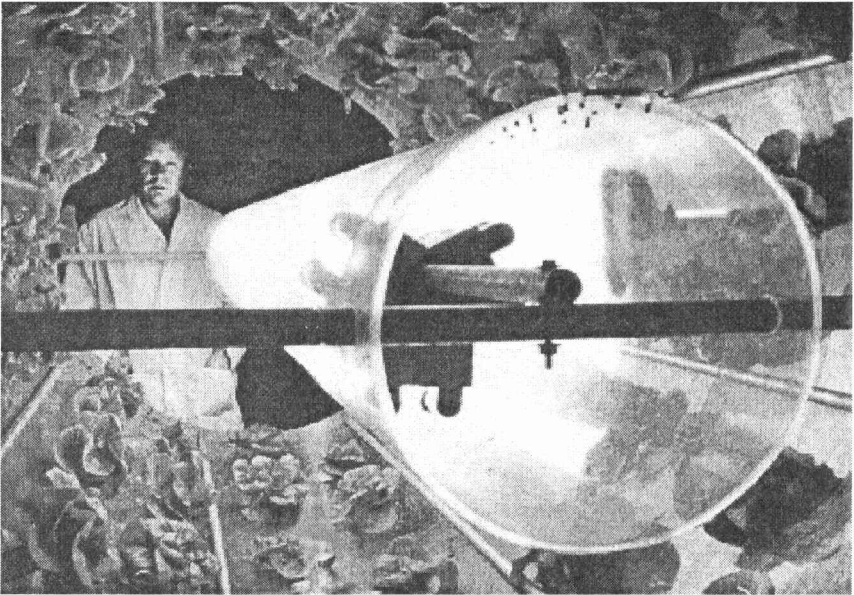


Рис. 5.2. Внешний вид цилиндрической оранжереи с вогнутой посадочной поверхностью

## 5.1. Оранжереи с различными формами посадочной и светящей поверхностей

### 5.1.1. Оранжереи со сферической посадочной поверхностью

Прототипами оранжерей со сферической посадочной поверхностью послужили два известных устройства: оранжерея К.Э. Циолковского, реконструированное описание которой приведено в работе (Адамович и Горшенин, 1997), и прибор “Биогравицат”, предназначенный для изучения прорастания семян в условиях микрогравитации (Nechitailo, Mashinsky, 1993). Оба эти устройства имели сферическую посадочную поверхность, но не имели светильника, создающего условия для организации самораздвигающегося посева

растений. Вследствие этого понадобилось добавить еще один конструктивный принцип для создания эффективной конструкции сферической космической оранжереи.

Устройство для выращивания растений по авторскому свидетельству № 914004 (Беркович и др., 1979b), схематическое изображение которого представлено на рис. 5.3, обеспечивало радиальное расположение стеблей в посеве за счет сферического светоотражающего экрана, внешнего по отношению к посадочной сфере, центр которого совпадал с центром посадочной сферы. На внутренней поверхности светоотражающего экрана было предложено установить равномерно распределенные источники света.

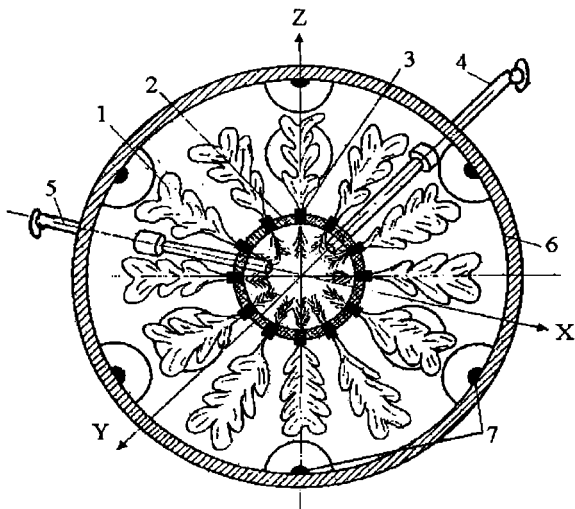


Рис. 5.3. Поперечное сечение устройства для выращивания растений на сферической посадочной поверхности. 1 – растения, 2 – посадочная сфера, 3 – посадочные гнезда, 4 и 5 – патрубki для подачи питательного раствора, 6 – светоотражающий экран, 7 – источники света

На рис. 5.3 изображено поперечное сечение описанного устройства. Растения 1 расположены на заполненной капиллярно-пористым почвозаменителем посадочной сфере 2 с гнездами для посадки семян 3. Посадочная сфера 2 установлена с возможностью вращения вокруг одной из двух взаимно перпендикулярных осей 4 и 5, пересекающихся в центре посадочной сферы 2. Сферический светоотражающий экран 6 окружает посадочную сферу 2

и установлен так, что их центры совпадают. На внутренней поверхности светоотражающего экрана 6 равномерно распределены источники света 7.

В условиях невесомости устройство работает следующим образом. Вследствие реакций фототропизма растения, высаженные на посадочную сферу 2, растут вдоль радиусов, приближаясь к источникам света 7, а корни растут внутрь посадочной сферы 2. Питательный раствор периодически поступает во внутреннюю полость посадочной сферы 2 и заполняет ее, вытесняя воздух через ее воздухопроницаемую поверхность. В условиях невесомости питательный раствор, как и всякая жидкость, принимает форму шара и удерживается корневым матом внутри посадочной сферы 2 силами поверхностного натяжения. Для удаления излишков питательного раствора из посадочной сферы 2 можно, например, периодически повышать давление воздуха между посадочной сферой 2 и светоотражающим экраном 6. При этом воздух, обогащенный кислородом из "надземной" части вегетационной камеры, будет проникать внутрь посадочной сферы 2 и вытеснять питательный раствор. Далее поступление и удаление питательного раствора в сферу периодически повторяется.

В наземных условиях для получения самораздвигающегося посева с радиальным расположением стеблей необходимо нейтрализовать реакции геотропизма растений при воздействии однонаправленной силы тяжести, за счет которых обеспечивается вертикальное расположение стеблей. С этой целью внутренняя посадочная сфера 2 должна непрерывно или периодически вращаться вокруг взаимно перпендикулярных осей 4 и 5 с такой скоростью, чтобы время передвижения любой из точек посадочной сферической поверхности от самого верхнего до самого нижнего положения не превышало порогового значения латентного времени гравитропической реакции растений.

Из геометрических соотношений следует, что площадь сферических посадочной и светящей поверхности в описанной установке определяется только их радиусами. В свою очередь, эти радиусы определяются в основном габитусом выращиваемых растений: высотой побегов и строением корневой системы. Таким образом, для выбранного вида растений сферическая посадочная площадь имеет фиксированное значение, что создает неудобства при необходимости создания оранжерей с различной производительностью. Для случая, когда посадочная площадь оранжереи должна быть меньше, чем соответствующая полная сферическая поверхность, мы предложили устройство для выращивания растений по авторскому свидетельству № 1047449 (рис. 5.4.) (Беркович и др., 1982а). Устройство дополнительно снабжено зеркальными экранами в виде усеченных конусов, причем верхние их основания расположены на сферическом светоотражающем экране, а нижние – на посадочной сфере. Устройство содержит посадочную сферу 1 с гнездами для семян 2 и

сферический светоотражающий экран 3, установленные с возможностью вращения вокруг взаимно-перпендикулярных осей 4. На внутренней поверхности светоотражающего экрана 3 установлены источники света 5. Посадочная сфера 1 соединена с узлом подачи питательного раствора 6. Между посадочной сферой 1 и светоотражающим экраном 3 установлены два конических зеркальных экрана 7.

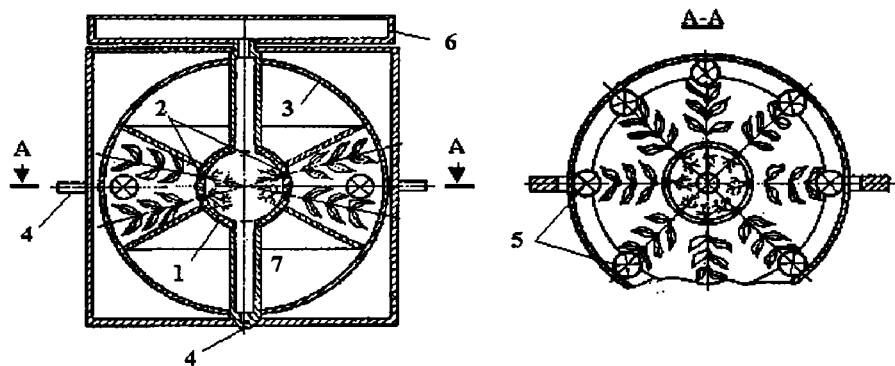


Рис. 5.4. Устройство для выращивания растений на части сферической посадочной поверхности с конусными светоотражающими экранами. 1 – сферическая посадочная поверхность, 2 – посадочные гнезда, 3 – светоотражающий экран, 4 – оси вращения, 5 – источники света, 6 – узел подачи питательного раствора, 7 – конические зеркальные экраны

Устройство работает следующим образом. Растения высаживаются с оптимальной для данной посадочной сферы плотностью на часть посадочной сферы, заключенную между зеркальными экранами 7. Углы конусов зеркальных экранов 7 подбираются из условия получения необходимой посадочной площади между конусами, т.е. обеспечения заданной производительности устройства при оптимальной плотности посева. Части сферического светоотражающего экрана 3, наружные по отношению к коническим зеркальным экранам 7, могут быть сняты для уменьшения объема, занимаемого устройством. Питание корней растений осуществляется с помощью узла подачи питательного раствора 6. При включении источников света 5, расположенных между коническими зеркальными экранами 7, за счет зеркального отражения света на границах посева имитируется светораспределение в полном сферическом посеве. С помощью этого предотвращаются многократные отражения света в пустой части сферического устройства, которые имели бы место при выращивании



самораздвигающегося посева растений лишь на некоторой части сферической посадочной поверхности в описанной ранее оранжерее, и, следовательно, уменьшаются непроизводительные потери световой энергии. Таким образом, в предлагаемом устройстве условия освещения растений и структура посева аналогичны таковым в оранжерее с посевом на всей посадочной сфере.

Описанная конструктивная схема была реализована в макетной вегетационной установке "Полусфера", построенной в ГНЦ РФ – ИМБП при поддержке гранта № 2137 МНТЦ (рис. 5.5).

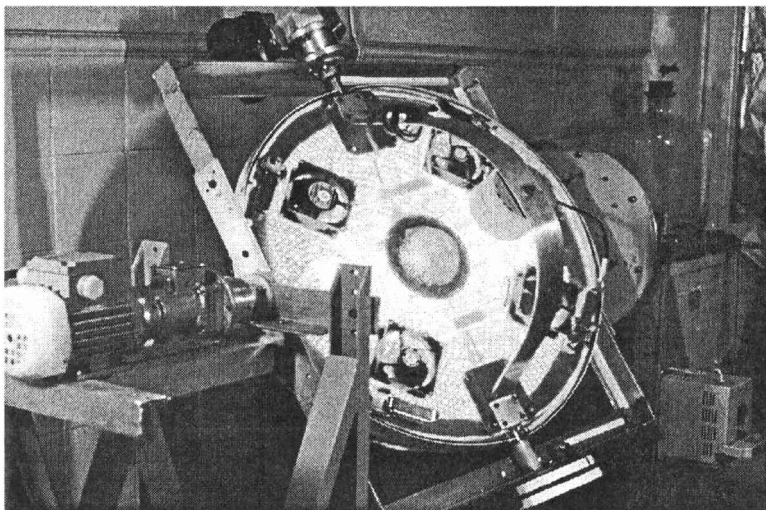


Рис. 5.5. Вегетационная установка "Полусфера"

Диаметр вегетационной камеры "Полусферы" – 290 мм, а диаметр сферической посадочной поверхности – 100 мм. Блок освещения на светоизлучающих диодах собран из 20 гибких печатных плат, имеющих форму усеченного сферического треугольника и покрывающих внутреннюю поверхность вегетационной полусферы. На светящей поверхности с суммарной площадью  $0,52 \text{ м}^2$  размещено 3080 красных и 420 синих светодиодов. Плотность потока фотонов в "Полусфере": в 4 см от поверхности светильника –  $230 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , на посадочной поверхности –  $750 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Для выращивания конвейерного посева растений на сферической посадочной поверхности была предложена установка по авторскому свидетельству № 1012846

(Беркович и др., 1982б). Она изображена на рис. 5.6. В этой установке светоотражающий экран выполнен в виде ряда concentрически расположенных вокруг посадочной сферы сферических двуугольников, причем промежутки между кромками смежных сферических двуугольников перекрыты светоотражающими экранами. Устройство содержит посадочную сферу 1 с гнездами 2 для растений, которая установлена на оси 3 вращения. Светоотражающий экран выполнен в виде ряда сферических двуугольников 4 с различными радиусами относительно посадочной сферы 1. Каждый сферический двуугольник 4 образован двумя пересекающимися плоскостями, линия пересечения которых совпадает с выбранной осью посадочной сферы 1. Радиусы двуугольников задаются высотой растений на соответствующих им шагах конвейерного посева. На внутренней стороне сферических поверхностей 4 установлены источники света 5. Промежутки между кромками смежных сферических поверхностей 4 перекрыты светоотражающими экранами 6, сделанными, например, из светоотражающей пленки. Внутри полой посадочной сферы 1 заведены патрубки подачи питательного раствора.

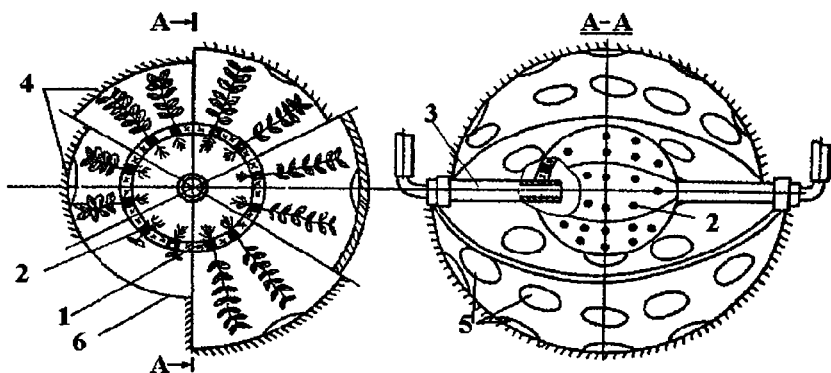


Рис. 5.6. Устройство для конвейерного выращивания растений на сферической посадочной поверхности. 1 – сферическая посадочная поверхность, 2 – посадочные гнезда, 3 – ось вращения, 4 – светоотражающие сферические двуугольники, 5 – источники света, 6 – люк

В условиях невесомости устройство работает следующим образом. Семена растений высаживают в гнезда 2, расположенные на участке посадочной сферы 1, который находится на наименьшем расстоянии от соответствующей сферической поверхности 4. Благодаря реакциям фототропизма стебли растений растут вдоль радиусов от центра посадочной сферы 1, а корни растут внутри посадочной сферы 1. При выращивании растений в течение

времени  $T/n$  (где  $n$  – число шагов конвейерного посева,  $T$  – длительность вегетации выбранной культуры) посадочная сфера 1 поворачивается вокруг оси 3 на угол  $360^\circ/n$  таким образом, чтобы расстояние от засеянного участка посадочной сферы 1 до следующего сферического двуугольника 4 светоотражающего экрана было увеличено на одну ступень. Далее высаживают растения в гнезда того участка, расстояние от которого до светоотражающего экрана становится минимальным. После повторения этой процедуры  $n$  раз вся посадочная сфера 1 оказывается заполненной растениями, причем на  $n$ -ом по счету шаге конвейера растения убирают, а после очередного поворота в гнезда 2 этого участка повторно высаживают семена растений. Питательный раствор подается внутрь полой посадочной сферы 1 к корням растений. Благодаря выбранной форме освещаемый объем практически полностью занят посевом и свет от источников 5 поглощается конвейерным посевом без заметных потерь.

### 5.1.2. Оранжереи с цилиндрической посадочной поверхностью

Схематическое изображение простейшей оранжереи с цилиндрической посадочной поверхностью по авторскому свидетельству № 818563 (Беркович и др., 1979а) представлено на рис. 5.7. Устройство содержит внутренний круговой цилиндр 1 с гнездами 2 для посадки семян, установленный на поворотной оси 3. Внутри цилиндра 1 выведен выходной патрубок 4 от узла подачи питательного раствора. Источники света 5 установлены на внешней цилиндрической поверхности 6, расположенной соосно с цилиндром. Внутренняя поверхность внешнего цилиндра 6 выполнена светоотражающей.

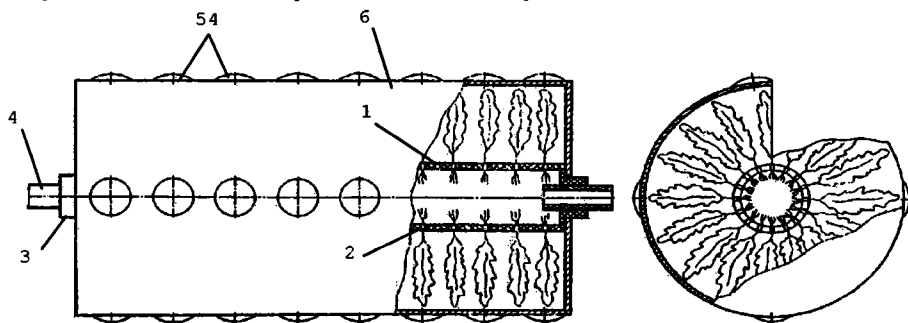


Рис. 5.7. Устройство для выращивания растений на цилиндрической посадочной поверхности. 1 – посадочная цилиндрическая поверхность, 2 – посадочное гнездо, 3 – ось вращения, 4 – патрубок подачи питательного раствора, 5 – источники света, 6 – светоотражающий цилиндр

В условиях невесомости устройство работает следующим образом. Семена растений высаживают в гнезда 2, расположенные вдоль образующих внутреннего цилиндра 1. При включенных источниках света 5 стебли растений вследствие их фототропизма будут расти вдоль нормалей к поверхности внутреннего кругового цилиндра 1. Питательный раствор подается к корням растений внутрь цилиндра 1 через выходной патрубок 4 узла питательного раствора. При описанном радиальном расположении верхушки растений находятся на большем расстоянии друг от друга, чем посадочные гнезда, благодаря чему уменьшается затенение нижних листьев верхними. Недостатком такой конструкции является неэффективное использование световой энергии на начальных этапах онтогенеза растений, когда их высота мала по сравнению с радиусом внешнего светоотражающего цилиндра 6 и лучи света от источников могут многократно отражаться от поверхности цилиндра 6 прежде, чем они достигнут листьев.

Более совершенные варианты конструкции оранжерей с цилиндрическими посадочными поверхностями для конвейерного выращивания растений были предложены в российском патенте № 2091009 (Беркович, Павловский, 1997). Первое из них, условно названное “Спиральной оранжереей” по форме светоотражающего экрана, схематически изображено на рис. 5.8. Эта компоновка была кратко описана в главе 4 на примере оранжереи “Фитоцикл”. Устройство содержит опорный узел 1, посадочный барабан 2, установленный в опорном узле 1 с возможностью вращения вокруг своей продольной оси, соосно расположенный светоотражающий экран 3 с равномерно распределенными на его внутренней поверхности источниками 4 света и узел 5 подачи воды к корневой системе растений. Светоотражающий экран 3 выполнен в форме поверхности, направляющая для образующей которой описана в полярных координатах уравнением дуги кривой:

$$r(\varphi) = r_0 + H_1 + H(\varphi), \quad (5.1)$$

где  $r(\varphi)$  – радиус-вектор направляющей;  $\varphi$  – угол поворота радиуса вектора; ( $0 \leq \varphi < 2\pi(n-1)/n$ );  $r_0$  – радиус посадочного барабана;  $H_1$  – высота растений в конце первого шага растительного конвейера;  $H(\varphi) = H(T \cdot \varphi / 2\pi)$  – кривая роста растений в полярных координатах, где  $H(t)$  – кривая роста растений;  $t$  – возраст растений;  $T$  – продолжительность вегетации растений в установке;  $n$  – число шагов растительного конвейера.

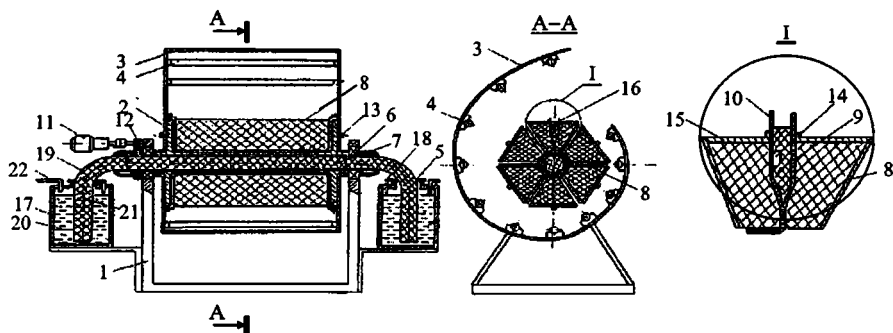


Рис. 5.8. Спиральная оранжерея для конвейерного выращивания растений на цилиндрической посадочной поверхности. 1 – опорный узел; 2 – посадочный барабан; 3 – светоотражающий экран; 4 – источники света; 5 – узел подачи жидкости к корневой системе; 6 – перфорированный сердечник; 7 – капиллярно-пористая среда; 8 – корневые модули; 9 – посадочные планки; 10 – фитиль; 11 – привод; 12 – редуктор; 13 – фиксатор; 14 – гнезда для семян; 15 – крышка; 16 – прорезь для фитиля; 17 – емкость; 18 – дренажное отверстие; 19 – патрубок; 20 – питательный раствор; 21 – капиллярно-пористый материал; 22 – выходной патрубок источника давления

Светоотражающий экран 3 установлен с возможностью зацепления с посадочным барабаном 2. Посадочный барабан 2 содержит полый перфорированный сердечник 6 с набивкой 7 из капиллярно-пористого материала, расположенные вдоль образующей перфорированного сердечника 6 корневые модули 8, имеющие в поперечном сечении форму трапеции и контактирующие меньшим основанием с наружной поверхностью сердечника 6 посадочного барабана 2. Проекция большего основания трапеции на плоскость, перпендикулярную продольной оси полого перфорированного сердечника 6, образует хорду окружности, проведенной по наружным граням углов, образованных большими основаниями и боковыми сторонами корневых модулей 8. Между внутренними поверхностями боковых сторон корневых модулей 8 расположены планки 9 для закрепления семян культивируемых растений. С наружными поверхностями указанных планок 9 и внутренними поверхностями меньших оснований вегетационных сосудов 8 контактируют влагопередающие фитили 10. Контактующие поверхности полого перфорированного сердечника 6 посадочного барабана 2 и корневых модулей 8 выполнены из влагоемкого гидрофильного капиллярно-пористого материала, например поропласта пенополивинилформаль (ППВФ). Посадочный барабан 2 имеет привод 11 для вращения

вокруг своей продольной оси. Привод 11 для вращения посадочного барабана 2 выполнен реверсивным и снабжен понижающим редуктором 12. Зацепление светоотражающего экрана 3 и посадочного барабана 2 выполнено с помощью фиксатора 13. Планки 9 имеют гнезда 14 для закрепления семян культивируемых растений, а корневые модули 8 снабжены крышками 15, изготовленными из гидрофобного капиллярно-пористого материала, например поролона, и имеют прорези 16 для влагопередающих фитилей 10. Спиральная установка для конвейерного выращивания растений монтируется на опорной раме 1 и имеет два посадочных места под подшипники вращения. Расстояние между упомянутыми подшипниками выбирается исходя из потребной производительности установки по растительной продукции. При использовании люминесцентных ламп это расстояние должно несколько превышать длину лампы выбранной мощности. На перфорированный сердечник 6 надеваются и закрепляются фиксирующими винтами две одинаковые втулки с торцевыми дисками посадочного барабана 2. Расстояние между торцевыми дисками должно быть на 4–5 см меньше, чем длина ламп выбранного типа. Концы перфорированного сердечника 6 выступают наружу за опорные подшипники, причем на одном конце сердечника 6 надета и закреплена винтами ведомая шестерня редуктора 12. Ведущая шестерня редуктора 12 вращается приводом 11, установленным на кронштейне, закрепленном на опорной раме 1. Внутри полого сердечника 6 помещается набивка 7 из влагоемкого пористого материала, например ППВФ, концы которой заправляются в патрубок 19, ведущий в емкость 17 с водой или питательным раствором. Снаружи полый перфорированный сердечник 6 обернут слоем листового ППВФ толщиной 2–3 мм. К наружным поверхностям торцевых дисков посадочного барабана 2 крепятся на винтах-фиксаторах боковые щеки светоотражающего экрана 3. Наружный контур боковых щек имеет форму, задаваемую в полярных координатах с центром на оси вращения посадочного барабана уравнением (5.1).

Светоотражающий экран 3 установки выполнен из листового анодированного алюминия, натянутого на наружные контуры боковых щек. Внутренние поверхности светоотражающего экрана 3 и боковых щек выкрашены светотехнической эмалью. Тринадцать люминесцентных ламп мощностью 20 Вт каждая крепятся в торцевых патронах, смонтированных на боковых щеках. Там же крепятся патроны для пускателей. Дроссели в цепи питания ламп вынесены в отдельный блок, закрепленный на опорной раме, во избежание перегрева вегетационной камеры. В среднем по длине поперечном сечении в светоотражающем экране 3 вырезаны четыре сквозных отверстия под углом 90° друг к другу, в которые вставлены четыре вытяжных вентилятора для охлаждения воздуха и листьев растений в установке. На внутренних поверхностях торцевых дисков посадочного барабана 2 выполнены десять направляющих радиальных пазов для установки девяти

вегетационных сосудов (корневых модулей) 8. Высота корневых модулей 8 трапецидального поперечного сечения определяется в зависимости от структуры корневой системы выбранной культуры растений. Для зеленных растений и редиса эта высота составляет в среднем 7–10 см. Остальные размеры корневого модуля определяются в зависимости от количества шагов конвейера, структуры урожая и расстояния между торцевыми дисками посадочного барабана. Корневые модули изготовлены на основе тонкоячейистой сетки из нержавеющей стали, натянутой на две одинаковые торцевые трапецидальные пластины из анодированного дюралюминия. Торцевые пластины имеют в верхней части отогнутые наружу кронштейны с резьбовыми отверстиями и крепежными винтами. Около нижнего основания через отверстия в торцевых трапецидальных пластинах пропущена спица из нержавеющей стали, закрепленная гайками снаружи на торцевых трапецидальных пластинах. Гайки служат выступами, входящими в радиальные направляющие пазы на внутренних поверхностях торцевых дисков посадочного барабана. На дне корневого модуля 8 в сетке прорезан ряд окон, распределенных по длине посадочного барабана. На спицу в нижней части корневого модуля нанизан жгут из ППВФ, вокруг которого петлей обернут прямоугольный фитиль из хлоринового полотна таким образом, что окна в сетке полностью перекрываются хлориновым полотном. Концы фитиля соединяют вместе и выводят наружу. Далее корневой модуль заполняют гранулированным или волокнистым почвозаменителем. Сверху корневой модуль закрывают крышкой 15 (рис. 5.8) из поролона толщиной 10 мм с продольной прорезью, через которую выводятся наружу концы фитиля. Поролоновая крышка 15 прижимается к гранулированному субстрату с помощью рамки из листового инния. Корневые модули крепятся винтами за кронштейны на торцевых пластинах в резьбовые глухие отверстия, выполненные на цилиндрической поверхности двух торцевых дисков посадочного барабана 2. В случае, когда посадочный барабан включает десять корневых модулей, углы между осями соседних глухих резьбовых отверстий составляют  $36^\circ$ . При необходимости переместить посадочный барабан 2 относительно светоотражающего экрана 3 отворачивают фиксатор 13, крепящий щеки светоотражающего экрана к внутренним поверхностям двух торцевых дисков. Затем светоотражающий экран 3 поворачивают относительно посадочного барабана 2 до попадания фиксаторов в соседние резьбовые отверстия на внутренних поверхностях дисков. Угол поворота между соседними резьбовыми отверстиями составляет  $36^\circ$ . Затем фиксаторы 13 закручивают, и новое положение сосудов остается неизменным в течение следующего шага конвейера. Для случая использования в наземных условиях узел подачи жидкости к корневой системе растений содержит заполняемую водой или питательным раствором емкость 17 (рис. 5.8) с перекрываемым дренажным отверстием 18, предназначенным для

выравнивания давления в емкости 17 с атмосферой, патрубков 19, сообщающий полость 20 емкости 17 с полостью перфорированного сердечника 6, набивку 21 из капиллярно-пористого материала, заполняющую полость патрубка 19 и контактирующую с набивкой перфорированного сердечника 6 посадочного барабана 2. Для улучшения смачивания фитилей 10 узел снабжен компрессором или иным источником давления, выходной патрубков 22 которого соединен с полостью 20 для создания в ней избыточного давления.

Опишем подробнее работу спиральной установки с выпуклой цилиндрической посадочной поверхностью на примере оранжереи «Фитоцикл» в наземных условиях при использовании ионитного гранулированного почвозаменителя в качестве корнеобитаемой среды и при культивировании зеленных культур – листовой горчицы и пекинской капусты – с длительностью товарной вегетации 30 дней. При запуске оранжереи включают двигатель, обеспечивающий релаксационное вращение посадочного барабана 2 вместе со светоотражающим экраном 3 со скоростью в пределах 4–10 об/мин. В емкость 17 заливают воду, соответствующую по качеству питьевой, которая вследствие капиллярного переноса подается по набивке 21 патрубка 19 и через перфорацию сердечника 6 и отверстия в дне корневых модулей к фитилям 10. Через фитили постепенно смачивается весь объем ионообменного субстрата в корневых модулях. Для ускорения этого процесса в емкость 17 можно подавать воздух с помощью ручного или иного компрессора при закрытом дренажном отверстии 18, но в наземных условиях проще регулировать расход подачи воды в корневые модули путем изменения в них уровня воды. После полного смачивания субстрата и фитиля между сведенными верхними концами последнего в прорезь крышки 15 корневого модуля 8, расположенного в окне светоотражающего экрана 3, вставляют посадочную планку 9 с наклеенными в ее боковые гнезда семенами выбранной культуры растений. Ширина посадочной планки 9 задает необходимую глубину посадки. На 3-й день двигатель выключают, отворачивают фиксаторы 13 и поворачивают светоотражающий экран на угол 36° таким образом, чтобы проростки растений на 1-м шаге конвейера оказались под ближайшим источником света 4. После этого фиксаторами 13 закрепляют новое положение светоотражающего экрана, вставляют посадочную планку с семенами в прорезь крышки корневого модуля №2 в окне светоотражающего экрана 3, включают источник 4 и вентиляторы на светоотражающем экране, а также двигатель, вращающий установку. При необходимости с помощью программного устройства можно задать световой период, т.е. время ежедневного включения и выключения ламп. На 6-й день после начала работы повторяют операцию поворота светоотражающего экрана 3 на угол 36° и посадки семян в следующий корневой модуль № 3 в окне светоотражающего экрана и т.д. на каждые третьи сутки после очередной посадки. На 30-е сутки после начала работы практически все



пространство между посадочным барабаном 2 и светоотражающим экраном 3 оказывается заполненным зеленым конвейерным посевом, причем растения на последнем шаге конвейера готовы к уборке. Двигатель останавливают, отворачивают фиксаторы 13, поворачивают светоотражающий экран в очередной раз на угол  $36^\circ$ , и корневой модуль с созревшими растениями оказывается в окне светоотражающего экрана. После этого посадочную планку и растения вынимают из корневого модуля. При этом корневой модуль может быть вынут из установки или оставлен в посадочном барабане. На освободившееся место между концами фитиля вставляют новую планку с наклеенными семенами. Далее возвращают корневой модуль на место, включают вращение и процесс продолжается. После 30 суток вегетации растительный конвейер в установке выходит на стационарный режим работы, обеспечивая каждые 3 дня урожай с одного корневого модуля. Процесс конвейерного выращивания растений в установке может продолжаться непрерывно до тех пор, пока не истощится запас солей в ионообменном субстрате, после чего субстрат необходимо заменить на свежий.

Другая конструкция оранжереи с цилиндрической посадочной поверхностью для конвейерного выращивания растений, названная "конусной цилиндрической оранжереей", изображена на рис. 5.9. Она содержит опорный узел 1, посадочный барабан 2, установленный в опорном узле с возможностью вращения вокруг своей продольной оси, соосно расположенный светоотражающий экран 3 с равномерно распределенными на его внутренней поверхности источниками 4 света и узел 5 подачи жидкости к корневой системе растений. Светоотражающий экран 3 выполнен в форме поверхности, образованной вращением вокруг продольной оси посадочного барабана отрезка кривой, описанной уравнением:

$$y(l) = r_0 + H_1 + H(t)(T-l/L), \quad (5.2)$$

где  $l$  – расстояние от края посадочного барабана;  $r_0$  – радиус посадочного барабана;  $H_1$  – высота растений в конце первого шага растительного конвейера;  $H(t)$  – кривая роста растений;  $t$  – возраст растений;  $T$  – продолжительность вегетации растений в установке;  $L$  – длина посадочного барабана.

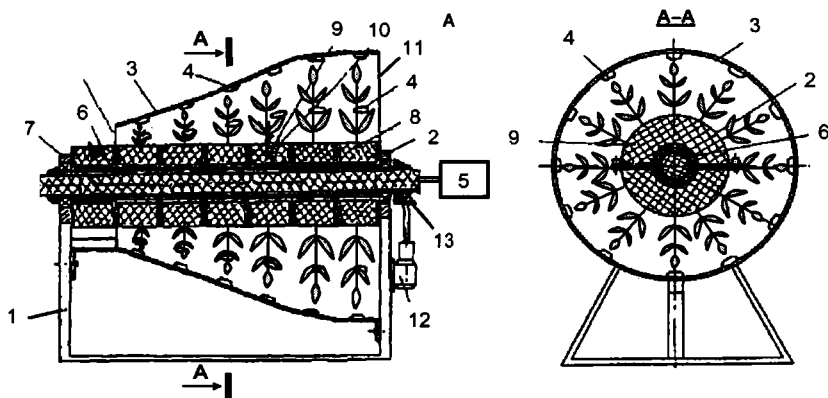


Рис. 5.9. Устройство для конвейерного выращивания растений на цилиндрической посадочной поверхности. 1 – опорный узел; 2 – посадочный барабан; 3 – светоотражающий экран; 4 – источники света; 5 – узел подачи питательного раствора; 6 – перфорированный сердечник; 7 – капиллярно-пористая набивка; 8 – разъемные кольцевые корневые модули; 9 – посадочные гнезда; 10 – фитили; 11 – окно для уборки урожая; 12 – привод посадочного барабана; 13 – редуктор

Посадочный барабан 2 содержит полый перфорированный сердечник 6 с набивкой 7 из капиллярно-пористого материала, разъемные кольцевые корневые модули 8, надеваемые на сердечник 6 с возможностью перемещения вдоль продольной оси сердечника 6 и с возможностью фиксации от проскальзывания при вращении посадочного барабана 2. На наружных боковых поверхностях корневых модулей 8 расположены посадочные гнезда 9, предназначенные для крепления семян культивируемых растений. С боковыми поверхностями посадочных гнезд 9 и внутренними кольцевыми поверхностями вегетационных сосудов 8 контактируют влагопередающие фитили 10. Контактующие поверхности полого перфорированного сердечника 6 посадочного барабана 2 и вегетационных сосудов 8 выполнены из влагоемкого капиллярно-пористого материала, например ППВФ. На поверхности светоотражающего экрана 3 со стороны первого шага растительного конвейера выполнено окно 11 для проведения технологических операций с корневыми модулями 8. Посадочный барабан 2 имеет привод 12 для вращения вокруг своей продольной оси. Привод 12 для вращения посадочного барабана 2 выполнен реверсивным и снабжен редуктором 13.

Работа этой установки отличается от работы спиральной оранжереи только тем, что кольцевые вегетационные сосуды 8 по окончании каждого шага конвейера перемещаются поступательно в одном направлении на ширину корневого модуля, причем снятый корневой модуль после уборки урожая снова засевают и переставляют в начало конвейерного посева на освободившееся на перфорированном сердечнике 6 место.

Кривая роста растений для определения формы светоотражающих экранов в обеих описанных цилиндрических конвейерных оранжереях определялась нами экспериментально в посевах листовой горчицы в условиях, близких к тем, которые были реализованы в оранжерее “Фитоцикл”. Близкую форму кривых роста в этих условиях имеют еще несколько зеленных культур, а также редис. Объемные и энергетические параметры спиральной и конусной цилиндрических оранжерей при одинаковой площади и радиусе посадочной поверхности, а также одинаковых кривых роста растений практически не отличаются. Выбор той или иной формы для конвейерной цилиндрической космической оранжереи определяется компоновочными требованиями в конкретном модуле пилотируемого космического аппарата.

### 5.1.3. Оранжереи с тороидальной посадочной поверхностью

Под определением “поверхность тороидальной формы” будем понимать поверхность, образованную путем вращения полуокружности вокруг оси (в дальнейшем будем называть ее главной осью вращения), параллельной ее диаметральной хорде и находящейся от этой хорды на расстоянии более близком, чем от любых других точек полуокружности. Если рассмотреть, как в процессе роста изменяются расстояния между верхушками стеблей растений, сориентированных вдоль нормалей к посадочной поверхности такой формы, то окажется, что раздвижение растений в плоскости, перпендикулярной главной оси вращения, имеет место лишь на наружной по отношению к этой оси вращения части тороидальной поверхности. Ниже будет показано, что для улучшения энергетических характеристик оранжерей целесообразно использовать только ту часть тороида, где происходит самораздвижение вегетирующих растений. Таким образом, в дальнейшем будем подразумевать под термином “тороидальная посадочная поверхность” поверхность, образованную вращением полуокружности вокруг оси, параллельной ее диаметральной хорде.

Схематическое изображение простейшей оранжереи с тороидальной посадочной поверхностью представлено на рис. 5.10.

Устройство содержит корневой модуль 1, патрубок 2 для подачи воздуха, воды и/или питательного раствора. Корневой модуль 1 имеет корпус, ограниченный круговой

цилиндрической поверхностью 3 и тороидальной посадочной поверхностью 4. Светоотражающий экран 5 имеет в основании круговую цилиндрическую поверхность 3 и образован поверхностью, которая получается при вращении полуокружности концентрической и большего диаметра по отношению к полуокружности, образующей при вращении тороидальную посадочную поверхность 4 корневого модуля 1, как правило, разбитую на отдельные секции, вокруг главной оси на угол, равный  $360^\circ$ . В тороидальной поверхности светоотражающего экрана 5 предусмотрено окно 6 для посадки и уборки растений (на рис. 5.10 не показано). На внутренней поверхности светоотражающего экрана 5 установлены источники 7 света. Корневой модуль 1 установлен с возможностью вращения относительно светоотражающего экрана 5, например, с помощью двигателя и зубчатой передачи (на рис. 5.10 не показаны).

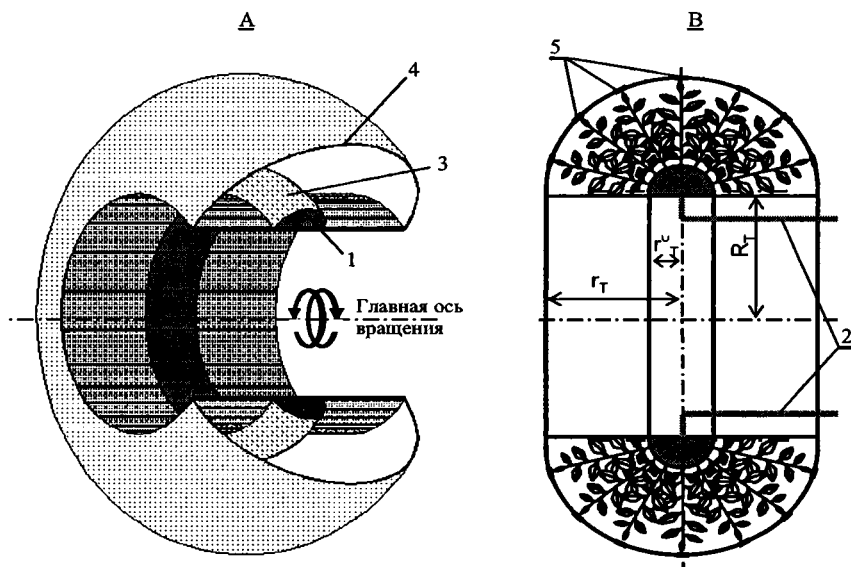


Рис. 5.10. Схематическое изображение вегетационной камеры с тороидальной посадочной поверхностью. А – общий вид с вырезом (без растений) и В – поперечное сечение вегетационной камеры;  $R_T$  – радиус вращения тороида;  $r_T$  – радиус освещаемой поверхности;  $r_0^0$  – радиус поперечного сечения корнеобитаемой зоны; 1 – корневой модуль; 2 – патрубок для подачи питательного раствора; 3 – посадочная поверхность; 4 – светоотражающий экран; 5 – источники света

Устройство работает следующим образом. Семена растений через окно 6 высаживают на тороидальной посадочной поверхности 4, постепенно проворачивая последнюю относительно светоотражающего экрана 5. Затем включают свет и вентиляторы вегетационной камеры. При включенных источниках света 7 стебли растений вследствие их фототропизма будут расти вдоль нормалей к тороидальной посадочной поверхности 4. Питательный раствор подается к корням растений внутрь тороидального корневого модуля 1 через патрубки 2, идущие от узла питательного раствора. Недостатком такой конструкции является неэффективное использование световой энергии на начальных этапах онтогенеза растений, когда их высота мала по сравнению с радиусом внешнего светоотражающего экрана 5 и лучи света от источников могут многократно отразиться от поверхности экрана 5 прежде, чем они достигнут верхушек растений в посеве.

Для более эффективного использования световой энергии при конвейерном выращивании растений была предложена конструкция оранжерей с тороидальной посадочной поверхностью, описанная в российском патенте № 1748753 (Беркович и др., 1990), изображенная на рис. 5.11. Это устройство отличается от вышеописанного в основном формой светоотражающего экрана 5, который представляет собой тороидальную поверхность, радиус образующей полуокружности у которой изменяется по закону:

$$r_r(\varphi_r) = r_0 + H_1 + H(\varphi_r), \quad (5.3)$$

где  $r_r(\varphi_r)$  – радиус-вектор поперечного сечения светоотражающего экрана;  $\varphi_r$  – угол поворота радиуса вектора круговой направляющей цилиндрической поверхности оранжерей от начального положения 1-го шага конвейера на посадочной тороидальной поверхности; ( $0 \leq \varphi_r \leq 2\pi$ );  $r_0$  – радиус посадочного барабана;  $H_1$  – высота растений в конце первого шага растительного конвейера;  $H(\varphi_r) = h(T \varphi_r / 2\pi)$  – кривая роста растений в полярных координатах, где  $h(t)$  – кривая роста растений;  $t$  – возраст растений;  $T$  – продолжительность вегетации растений в установке;  $n$  – число шагов растительного конвейера.

Семена растений через окно 6 высаживают на части тороидальной посадочной поверхности 4, соответствующей последнему шагу конвейера и находящейся против участка поверхности светоотражающего экрана 5 с наибольшими диаметрами образующей полуокружности. Затем корневой модуль 1 поворачивают на угол, равный  $360^\circ/n$ , где  $n$  – число шагов конвейера, например, с помощью двигателя 8 и зубчатой передачи 9, и семена оказываются в зоне, соответствующей первому шагу конвейера и находящейся против поверхности светоотражающего экрана 5 с наименьшими диаметрами образующей полуокружности. Через патрубок 2 подают воду или питательный раствор для смачивания и питания семян, а затем и проростков, а также воздух для аэрации корневой зоны и удаления

корневых метаболитов. На участке светоотражающего экрана 5, соответствующем первому шагу конвейера, включают источник 7 света. При отсутствии силы тяжести растения растут под действием реакций фототропизма вдоль направления градиента светового поля, т.е. по нормальям к посадочной поверхности 4 и к поверхности светоотражающего экрана 5 с источниками 7 света. Через время, соответствующее шагу конвейера, все названные операции повторяются. Через  $n$  шагов конвейера вся посадочная поверхность 4 оказывается занятой растениями и включены все источники света 7. На каждом последующем шаге конвейера через окно 6 производится уборка растений последнего шага конвейера, посадка на их место семян и поворот вегетационного сосуда на угол  $360^\circ/n$ .

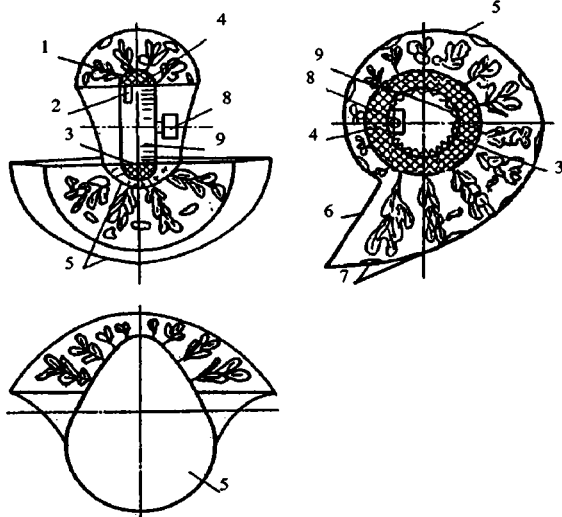


Рис. 5.11. Устройство для конвейерного выращивания растений на тороидальной посадочной поверхности. 1 – корневой модуль с посадочными гнездами, 2 – патрубок для подачи питательного раствора и воздуха, 3 – цилиндрическая круговая поверхность, 4 – тороидальная посадочная поверхность, 5 – светоотражающий экран, 6 – люк, 7 – источники света, 8 – двигатель, 9 – зубчатая передача

Тороидальная компоновка может быть удобна для космических модулей с цилиндрическим корпусом, т.к. ее можно размещать в поперечном сечении гермообъема и обеспечивать свободный проход экипажа через центральное отверстие тороидальной вегетационной камеры.

## 5.2. Объемные характеристики посевов на посадочных поверхностях различной формы

В главе 3 мы сформулировали критерий оптимизации характеристик космической оранжереи в виде максимума величины  $Q$  – удельной производительности оранжереи на потребляемые бортовые ресурсы. Согласно формуле (3.10), величина  $Q$  обратно пропорциональна объему оранжереи, большую часть которого составляет объем вегетационной камеры. Сравним объемы, занимаемые посевом растений на плоской и на криволинейных посадочных поверхностях. Для корректного сравнения посевов введем следующие допущения:

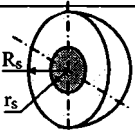
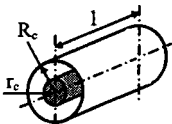
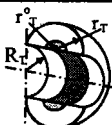
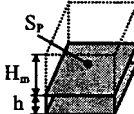
- 1) вид, количество и возраст растений в посевах одинаковы;
- 2) усредненные морфометрические показатели растений, в частности распределение фотосинтезирующих органов по высоте растений в посевах, одинаковы; обозначим для определенности максимальную высоту надземной части растений через  $H_m$ , высоту корнеобитаемой зоны через  $h$ ;
- 3) освещаемая лампами площадь посевов растений на уровне их верхних листьев, которую обозначим через  $S_L$ , одинакова;
- 4) плотность нисходящего потока энергии ФАР на уровне верхушек растений для каждого посева одинакова, т.е. посевы получают одну и ту же энергию фотосинтетически активной радиации за единицу времени.

Рассмотрим три основных варианта криволинейной посадочной поверхности в космических оранжереях: сферическую, цилиндрическую и тороидальную. Обозначим объемы, занимаемые посевами растений, на плоскости и на выпуклых сферической, цилиндрической и тороидальной поверхностях, соответственно, через  $V_P$ ,  $V_S$ ,  $V_C$ ,  $V_T$ .

В табл. 5.1 представлены основные геометрические параметры и выражения для оценки площади и объема вегетационных камер с выпуклыми посадочными поверхностями и светоотражающими экранами различной формы. Посадочная и освещаемая поверхности для тороидальной оранжереи, представленные в этой таблице, были вычислены нами с использованием 1-й теоремы Гульдена (Кудрявцев, 1989), гласящей, что поверхность тела, образованного вращением плоской кривой (в нашем случае полуокружностью) вокруг оси, лежащей в плоскости этой кривой и не пересекающей ее, равна произведению длины кривой на длину окружности, описываемой при этом вращении центром тяжести кривой. Выражение для объема, занимаемого посевом на тороидальной посадочной поверхности, которое представлено в табл. 5.1, получено на основании 2-й теоремы Гульдена (Кудрявцев, 1989): объем тела, образованного вращением плоской фигуры (в нашем случае полукруга) вокруг оси, лежащей в плоскости этой кривой и не пересекающей ее, равна произведению

Таблица 5.1

Параметры и соотношения поверхностей и объемов посевов в оранжереях с плоской и с выпуклыми посадочными поверхностями

Параметры и показатели	Форма посадочной поверхности			
	Сферическая	Цилиндрическая	Торондальная	Плоская
Схематические изображения вегетационных камер с указанием характерных размеров				
Радиус посадочной поверхности	$r_s = h$	$r_c = h$	$r_1^0 = h$	$\infty$
Площадь посадочной поверхности	$S_s' = 4\pi r_s^2 = 4\pi h^2$	$S_c' = 2\pi r_c l = 2\pi h l$	$S_t' = 2\pi^2 r_1^0 \left( R_r + \frac{2}{\pi} r_r^0 \right)$	$S_p$
Радиус освещаемой поверхности	$R_s = h + H_m$	$R_c = h + H_m$	$r_r = h + H_m$	$\infty$
Площадь освещаемой поверхности	$S_s = 4\pi R_s^2 = 4\pi (h + H_m)^2$	$S_c = 2\pi R_c l = 2\pi (h + H_m) l$	$\begin{aligned} * S_t &= 2\pi^2 r_r \left( R_r + \frac{2}{\pi} r_r \right) = \\ &= 2\pi^2 (h + H_m) \left( R_r + \frac{2}{\pi} (h + H_m) \right) \end{aligned}$	$S_p$
Объем, занимаемый посевом	$V_s = \frac{4}{3} \pi R_s^3 = \frac{1}{3} S_s (h + H_m)$	$V_c = \pi R_c^2 l = \frac{1}{2} S_c (h + H_m)$	$\begin{aligned} ** V_t &= 2\pi^2 r_r^2 \left( R_r + \frac{2}{\pi} r_r \right) = \\ &= \frac{1}{2} S_t r_r = \frac{1}{2} S_t (h + H_m) \end{aligned}$	$V_p = S_p (h + H_m)$
Отношение объема посева к объему посева на плоскости при $S_s = S_c = S_t = S_p = S_L$	1/3	1/2	1/2	1

\* – согласно 1-ой теореме Гульдена; \*\* – согласно 2-ой теореме Гульдена;  $H_m$  – максимальная высота растений в съемном возрасте;

$h$  – высота хорясобитаемой зоны;  $S_L$  – освещаемая площадь посева;  $l$  – длина вегетационной камеры;  $R_r$  – радиус вращения торояда



площади фигуры на длину окружности, описываемой при этом вращении центром тяжести этой площади.

Данные табл. 5.1 свидетельствуют о том, что при одинаковой массе растений в посеве сферическая компоновка космической оранжереи с выпуклой посадочной поверхностью может дать максимальный выигрыш по объему приблизительно в 3 раза, а цилиндрическая и тороидальная – в 2 раза по сравнению с вариантом традиционного посева на плоскости. Формулы из табл. 5.1 подтверждают также, что в случае сферического посева величины как посадочной, так и освещаемой поверхности в вегетационной камере выражаются через морфометрические характеристики растений:  $h$  и  $H_m$  и, таким образом, не могут быть выбраны произвольно. Вследствие этого, как мы уже отмечали выше, при оптимальном значении плотности посадки растений суммарное количество выбранных растений, а следовательно, и производительность сферической оранжереи будут ограничены сверху. Увеличение радиуса посадочной сферы свыше значения  $(h + H_m)$  в этом случае привело бы к неоправданному завышению удельного объема вегетационной камеры и ухудшению ее характеристик. В случае цилиндрической или тороидальной формы вегетационной камеры выбор площади посадочной поверхности может осуществляться в широком диапазоне значений без ухудшения удельной производительности за счет параметров, не связанных непосредственно с размерами растений, таких как длина,  $l$ , для цилиндра или радиус вращения,  $R_T$ , для тороида. Для корневых систем различных видов растений при разных методах культивирования существуют свои ограничения минимального объема корнеобитаемой зоны и параметра  $h$ , которые должны учитываться при выборе формы и размеров космической оранжереи.

Рассмотрим для сравнения при вышеизложенных допущениях объемные характеристики вегетационной камеры с посевом растений на вогнутой цилиндрической поверхности, показанной схематично на рис. 5.1 С и описанной в работе (Броди, 1980). В этом случае радиус цилиндрической вегетационной камеры с вогнутой поверхностью должен составлять:

$$R_{cc} = h + H_m + S_L/2\pi l, \quad (5.4)$$

где  $l$  – длина вегетационной цилиндрической камеры. Соответственно выражение для объема такой камеры можно записать в виде:

$$V = \pi(h + H_m)^2 l + S_L(h + H_m) + S_L^2/4\pi l. \quad (5.5)$$

Отметим, что первое слагаемое в правой части этого равенства равно объему цилиндрической вегетационной камеры с выпуклой посадочной поверхностью, а второе слагаемое – объему вегетационной камеры с плоской посадочной поверхностью. Таким

образом, из уравнения (5.5) следует, что цилиндрическая компоновка вегетационной камеры с вогнутой посадочной поверхностью имеет худшую объемную характеристику, чем у камеры с выпуклой посадочной поверхностью и даже чем у камеры с плоской поверхностью. Пожалуй, единственным преимуществом цилиндрической компоновки с вогнутой посадочной поверхностью является высокий коэффициент использования световой энергии, излучаемой лампой, на освещение посева. Здесь практически не существует потерь на отражение прямого светового потока от светоотражающего экрана, которые почти неизбежны при других компоновках оранжерей. Однако, как показали расчеты, в светильнике цилиндрической конвейерной оранжереи "Фитоцикл СД" с выпуклой посадочной поверхностью потери световой энергии на отражение от стенок составляют лишь нескольких процентов от суммарного светового потока светодиодов.

В заключение отметим, что в случае конвейерных посевов растений соотношения между объемами посевов, указанные в табл. 5.1, сохраняются для каждого шага растительного конвейера, а объем вегетационной камеры можно определить приблизительно как сумму объемов посевов на всех шагах конвейера. Таким образом, соотношения объемов справедливы и для случая конвейерных оранжерей с криволинейными посадочными поверхностями.

### 5.3. Энергетические характеристики посевов

Как известно, основная часть энергетических затрат при выращивании растений в условиях светокультуры приходится на освещение растений (Cuello et al., 2001; Тихомиров и др., 2000). В главе 3 было показано, что, согласно предложенному Q-критерию, экономия затраченной на освещение растений энергии должна быть одной из важнейших целей при совершенствовании конструкции космических оранжерей. Рассмотрим, как зависит продуктивность посевов растений от плотности потока падающей на посев фотосинтетически активной радиации в вегетационных камерах с разными формами посадочных поверхностей.

Широко известна модель роста растений в гомогенном сомкнутом посеве в фазе вегетативного роста для наземных условий, т.е. на плоской посадочной поверхности, в которой скорость роста биомассы в посеве,  $dM/dt$ , пропорциональна скорости нетто-фотосинтеза посева (Charles-Edwards, 1981; Сиротенко, 1981):

$$dM/dt = \varepsilon (P_g - R) = \varepsilon P_c, \quad (5.6)$$

где  $P_c$  – скорость нетто-фотосинтеза посева;  $P_g$  – скорость брутто-фотосинтеза за вычетом фотореспирации для  $C_3$  – растений;  $R$  – скорость темнового дыхания;  $\varepsilon$  – константа.

Выражение (5.6) часто называют уравнением Дэвидсона-Филипа.

Проанализируем, как соотносятся скорости роста биомассы в посевах, удовлетворяющих трем принятым в предыдущем разделе допущениям, при одинаковом суммарном потоке световой энергии, падающей на посев. Скорость дыхания растений в высокопродуктивных посевах, реализуемых в космических оранжереях, обычно бывает много меньше, чем скорость брутто-фотосинтеза, поэтому будем в дальнейшем для упрощения пренебрегать этой величиной. В таком случае скорость фотосинтеза на единицу площади освещаемого листа можно записать в форме модели Чарльза-Эдвардса, учитывающей фотореспирацию (Charles-Edwards, 1981):

$$P(I) = \alpha I(\tau c - \beta) / (\alpha I + \tau c) = (\tau c - \beta) / (1 + \tau c / \alpha I). \quad (5.7)$$

Здесь  $I$  – плотность светового потока на поверхности листа;  $c$  – концентрация  $CO_2$  в окружающей среде,  $\alpha$  – коэффициент полезного использования света листом при нелIMITирующей концентрации  $CO_2$ ;  $\beta$  – полная проводимость карбоксилирования в листе; для  $C_4$  – растений  $\beta = 0$ ;  $\tau$  – константа фотореспирации.

Скорость нетто-фотосинтеза на единицу посадочной или освещаемой площади посева на плоскости в наземных условиях может быть определена, согласно работе (Thornly, 1976), в таком виде:

$$P_C^P(I) = \int_0^{H_p} P(I) dz = \int_0^L P(I) dL, \quad (5.8)$$

где  $H$  – высота побегов растений в посевах;  $z$  – текущая высота посева;  $L$  – кумулятивный, т.е. зависящий от  $z$ , листовой индекс посева.

С учетом допущения 3 для плоского сомкнутого посева площадью  $S_p$  с количеством растений  $n$  и усредненной функцией распределения по высоте растения площади поверхности фотосинтезирующих органов, равной  $A(z)$ , можно записать:

$$L = \frac{n}{S_p} \int_0^{H_p} A(z) dz = \frac{n}{S_L} \int_0^{H_p} A(z) dz, \quad (5.9)$$

где  $S_L$  – освещаемая площадь посева,  $H_m$  – максимальная высота надземной части посева.

Из уравнения (5.9) и принятых выше допущений следует, что функцию  $L(z)$  в нашем случае можно считать одинаковой для всех сравниваемых посевов, если рассматривать в качестве площади посева его освещаемую, а не посадочную площадь. В дальнейшем будем определять листовой индекс как величину суммарной площади фотосинтезирующей поверхности посева, приходящейся на единицу освещаемой поверхности посева. Заметим, что такое определение листового индекса не противоречит общепринятому определению для посевов на плоскости, поскольку для этих посевов освещаемая и посадочная площади

одинаковы. В этом случае в уравнении (5.8) пределы интегрирования также будут одинаковы для посевов со всеми рассматриваемыми формами посадочной поверхности.

Рассмотрим теперь характер изменения светового потока по глубине в зависимости от формы посадочной поверхности посевов. Следуя теории Монси-Саэки (Monsi, Saeki, 1953), приближенно описывающей светораспределение в наземном растительном покрове как гомогенной среде (модель “большого листа”), можно выразить плотность светового потока, падающего вертикально на обе поверхности листа на глубине, соответствующей листовому индексу  $L$  в посеве, через величину:

$$I_p(L) = \frac{1+r}{1-m} K \cdot I_0 \exp(-K \cdot L). \quad (5.10)$$

Здесь  $I_0$  – плотность вертикального светового потока над посевом;  $m$  – доля рассеянного листом светового потока, направленная вниз;  $r$  – доля светового потока, направленная вверх;  $K$  – коэффициент экстинкции света.

В рамках упомянутой теории коэффициенты  $m$ ,  $r$  и  $K$  считаются постоянными для всех листьев посева. При рассмотрении закона изменения плотности светового потока по высоте посевов, культивируемых на выпуклых криволинейных посадочных поверхностях, необходимо учитывать дополнительно фактор, влияющий на плотность светового потока в глубине посева: уменьшение освещаемой площади посева по мере приближения световых лучей к посадочной поверхности, т.е. своеобразное концентрирование светового потока в глубине посева. Согласно экспоненциальному закону (5.10), слои всех сравниваемых посевов с одинаковой толщиной  $dz$ , имеющие одинаковый кумулятивный листовой индекс  $L$ , поглощают при принятых допущениях одну и ту же долю падающей на посев сверху световой энергии, дошедшей до глубины  $z$ . Следовательно, суммарная энергия светового потока, дошедшая до глубины  $z$ , должна быть одинакова для всех рассматриваемых посевов. В посевах на плоской поверхности этот световой поток на любом уровне распределяется по неизменной площади  $S_p = S_L$ , а, например, в сферическом посевах – по площади:

$$S(z) = S_L(h+H_m - z)^2 / (h+H_m)^2 < S_L. \quad (5.11)$$

Соответственно плотность светового потока на глубине  $z$  для сферического посева запишется в виде:

$$I_s(L) = \frac{(1+r)(h+H_m)^2 K I_0 \exp(-KL)}{(1-m)(h+H_m - z)^2}. \quad (5.12)$$

Зная количество растений в посевах и функции распределения площади фотосинтезирующих органов  $A(z)$  по высоте посева, из уравнения (5.9) можно определить

функцию  $z = z(L)$ , которая входит в уравнение (5.12). Эта функция при наших допущениях будет одинаковой для всех рассматриваемых посевов.

Аналогичным образом рассуждая, можно выразить соотношение между функциями плотности светового потока от кумулятивного листового индекса в сравниваемых посевах на плоскости и на выпуклых поверхностях следующими формулами:

$$\begin{aligned} I_S(L) &= I_P(L)S_I/S_S(L); \\ I_C(L) &= I_P(L)SL/S_C(L); \\ I_T(L) &= I_P(L)S_I/S_T(L). \end{aligned} \tag{5.13}$$

Согласно работе (Thornly, 1976), скорость нетто-фотосинтеза на единицу освещаемой площади посева на плоскости с учетом выражений (5.7), (5.8) и (5.10) можно записать в виде:

$$P_C^P = (\tau c - \beta) \cdot \int_0^L \frac{dL}{1 + \frac{(1-m)\tau c \exp(KL)}{(1+r)\alpha KI_0}}. \tag{5.14}$$

Аналогичным образом для скорости нетто-фотосинтеза посевов на выпуклых посадочных поверхностях можно получить следующие значения:

$$P_C^C = (\tau c - \beta) \cdot \int_0^L \frac{dL}{1 + \frac{(1-m)\tau c}{(1+r)\alpha KI_0} \left(1 - \frac{z}{h + H_m}\right) \cdot \exp(KL)}; \tag{5.15}$$

$$P_C^S = (\tau c - \beta) \cdot \int_0^L \frac{dL}{1 + \frac{(1-m)\tau c}{(1+r)\alpha KI_0} \left(1 - \frac{z}{h + H_m}\right)^2 \exp(KL)}; \tag{5.16}$$

$$P_C^T = (\tau c - \beta) \cdot \int_0^L \frac{dL}{1 + \frac{(1-m)\tau c}{(1+r)\alpha KI_0} \left(1 - \frac{z}{h + H_m}\right) \left(1 - \frac{z}{\frac{\pi R_T}{2} + h + H_m}\right) \exp(KL)}. \tag{5.17}$$

Здесь  $z \in [0, H_m]$ .

Правые части уравнений (5.14) – (5.17) отличаются друг от друга только величиной коэффициента при выражении  $\exp(KL)$  во втором слагаемом в знаменателе подынтегральных выражений. Если величину этого коэффициента для случая посева на плоскости обозначить через  $\lambda$  ( $\lambda > 0$ ), то соответствующие коэффициенты для посевов на выпуклых посадочных поверхностях будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} - \text{ для цилиндрической поверхности:} & \quad \lambda [1 - z/(h + H_m)]; \\ - \text{ для сферической поверхности:} & \quad \lambda [1 - z/(h + H_m)]^2; \end{aligned} \tag{5.18}$$

– для тороидальной поверхности: 
$$\lambda\left(1 - \frac{z}{h + H_m}\right)\left(1 - \frac{z}{\frac{\pi R_T}{2} + h + H_m}\right).$$

Поскольку в нашем случае  $z/(h+H_m) < 1$ , то при любых фиксированных значениях  $L \neq 0$  и  $z(L) \neq 0$  выполняется неравенство:

$$\lambda > \lambda\left(1 - \frac{z}{h + H_m}\right) > \lambda\left(1 - \frac{z}{h + H_m}\right)\left(1 - \frac{z}{\frac{\pi R_T}{2} + h + H_m}\right) \geq \lambda\left(1 - \frac{z}{h + H_m}\right)^2. \quad (5.19)$$

С учетом неравенства (5.19) и уравнений (5.14–5.17) для любых  $L$  и  $z(L)$  можно написать соотношение:

$$P_c^S \geq P_c^T > P_c^c > P_c^P. \quad (5.20)$$

Тогда из неравенства (5.20) и уравнения (5.6) следует:

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)_s \geq \left(\frac{dM}{dt}\right)_T > \left(\frac{dM}{dt}\right)_c > \left(\frac{dM}{dt}\right)_P, \quad (5.21)$$

где  $dM/dt$  – скорости прироста биомассы для различных форм посадочной поверхности, соответствующих указанным нижним индексам.

Таким образом, наши рассуждения показывают, что одна и та же энергия, затраченная на освещение растений, позволяет получить большую продуктивность в рассмотренных нами самораздвигающихся посевах на выпуклых криволинейных посадочных поверхностях, чем в случае обычного посева на плоскости. При этом наибольшей продуктивностью на единицу энергии потенциально обладает посев на сфере, а наименьшей – посев на цилиндре. Тороидальная посадочная поверхность занимает промежуточное положение в смысле обеспечения энергетической эффективности посева. При увеличении или уменьшении отношения радиуса вращения тороида  $R_T$  к радиусу образующей полуокружности  $r_T$  эта эффективность приближается к случаю цилиндрического или сферического посева, соответственно. При  $R_T = 0$  тороид вырождается в шар, а при  $R_T \rightarrow \infty$  тороид преобразуется в цилиндр.

Увеличение удельной продуктивности самораздвигающихся посевов обусловлено уменьшением затухания плотности потока световой энергии, проникающего на некоторую глубину внутрь посева, по сравнению с обычным посевом на плоской посадочной поверхности. Это происходит за счет концентрации светового потока на уменьшающихся по мере продвижения лучей от верхушек побегов к посадочной поверхности освещаемых поверхностях. Уменьшение площади слоя посева на сферической поверхности пропорционально глубине слоя во второй степени, а в посевах на цилиндрической

поверхности – в первой степени. Вследствие этого при одинаковой архитектонике растений нижние листья в посевах на выпуклых поверхностях оказываются в лучших условиях освещения, чем в обычном посеве на плоскости. Описанные эффекты будут наглядно продемонстрированы в данной главе на результатах компьютерного моделирования светораспределения в посевах на цилиндрической посадочной поверхности.

Таким образом, в рамках приведенной модели было доказано, что за счет изменения компоновки оранжереи возможно повысить ее удельную производительность на единицу потребляемой энергии.

#### 5.4. Сравнение эффективности различных компоновок космических оранжерей с выпуклыми посадочными поверхностями

Пользуясь полученными в табл. 5.1 выражениями для освещаемой поверхности посевов, выразим законы самораздвижения растений в посевах на различных посадочных поверхностях в процессе роста. Согласно физическому смыслу, мы понимаем под термином “закон самораздвижения посева” на криволинейной посадочной поверхности функцию вида:

$$\sigma(t) = \frac{S^o(t)}{S^p}, \quad (5.22)$$

где  $S^o(t)$  и  $S^p$  – площадь освещаемой поверхности посева растений в возрасте  $t$  и площадь посадочной поверхности.

Обозначим такую морфометрическую характеристику растений выбранного вида, как соотношение функций высоты побегов и корнеобитаемой зоны в процессе их роста через функцию  $\chi(t)$ . Тогда законы самораздвижения посевов принимают следующий вид:

для сферы: 
$$\sigma_s(t) = \frac{1}{h^2} [h + H(t)]^2 = [1 + \chi(t)]^2, \quad (5.23)$$

для цилиндра: 
$$\sigma_c(t) = \frac{1}{h} [h + H(t)] = 1 + \chi, \quad (5.24)$$

для торонда: 
$$\sigma_T(t) = 1 + \frac{H(t)}{h} + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{H(t)[h + H(t)]}{h \left( R_T + \frac{2h}{\pi} \right)} = 1 + \chi + \chi \frac{1 + \chi}{1 + \frac{\pi R_T}{2h}}, \quad (5.25)$$

где  $h$  – высота корнеобитаемой зоны, или высота корневого модуля;  $H(t)$  – высота побегов в возрасте  $t$ .

Рис. 5.12 и 5.13 иллюстрируют кривые самораздвижения посевов растений листовой горчицы и пекинской капусты, экспериментальные кривые роста  $H(t)$  для которых

приведены в табл. 5.2, а высота корнеобитаемой зоны  $h$  принята равной высоте вегетационного сосуда в оранжерее “Фитоцикл”, т.е. 7 см.

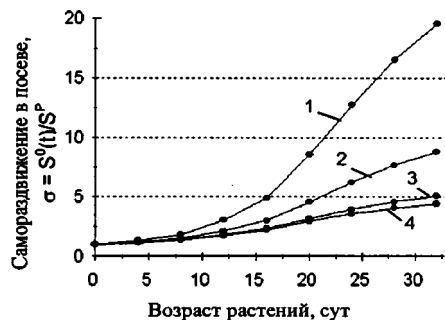


Рис. 5.12. Кривые самораздвижения посевов растений салатной горчицы для различных форм выпуклых посадочных поверхностей радиусом 7 см. 1 – сферическая поверхность; 2 – тороидальная поверхность с  $RT = 10$  см; 3 – тороидальная поверхность с  $RT = 100$  см; 4 – цилиндрическая поверхность

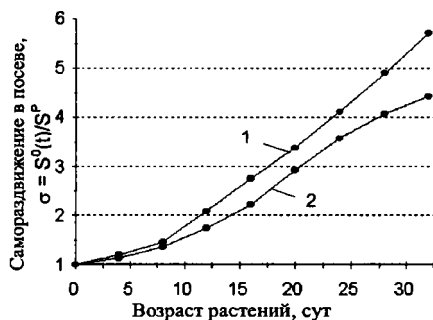


Рис. 5.13. Кривые самораздвижения посевов растений салатной горчицы и пекинской капусты на цилиндрической посадочной поверхности радиусом 7 см. 1 – для капусты пекинской; 2 – для салатной горчицы

Таблица 5.2

Кривые роста листовой горчицы и пекинской капусты, культивируемых в оранжерее “Фитоцикл”

Возраст растений, дни	0	4	8	12	16	20	24	28	32
Высота побегов горчицы, см	0	1,0	2,5	5,2	8,5	13,5	18,0	21,5	24,0
Высота побегов капусты, см	0	1,4	3,2	7,6	12,3	16,7	21,8	27,3	33,0

Анализ кривых самораздвижения растений в посевах позволяет сделать следующие заключения.

- Площадь освещаемой поверхности самораздвигающихся посевов на выпуклых посадочных поверхностях возрастает по мере увеличения высоты побегов, при этом она увеличивается линейно – на цилиндрической посадочной поверхности и быстрее, чем линейно – на сферической посадочной поверхности.



- Площадь освещаемой поверхности посевов на тороидальной посадочной поверхности по мере увеличения высоты побегов растет тем быстрее, чем меньше радиус вращения тороида  $R_T$ . При  $R_T = 100$  см закон раздвижения близок к таковому на цилиндрической посадочной поверхности, а при  $R_T = 10$  см скорость увеличения освещаемой поверхности посева листовой горчицы оказалась приблизительно вдвое большей, чем на цилиндрической посадочной поверхности.
- Площадь освещаемой поверхности посевов по мере увеличения высоты побегов растет тем быстрее, чем больше соотношение высоты побегов и корневой зоны,  $\chi$ .

Как было показано в главе 1, известные исследовательские оранжереи имеют объем порядка  $0,1 \text{ м}^3$  и мощность энергопотребления около 250 Вт, поэтому экономия объема и энергии за счет применения в них выпуклых посадочных поверхностей не может быть существенной. Однако для производственных космических оранжерей выигрыш за счет оптимизации формы посадочной поверхности может оказаться весьма значительным. Испытания оранжереи "Витацикл", например, позволили оценить экономию мощности электроэнергии для витаминной оранжереи с номинальным энергопотреблением 1 кВт величиной до 280 Вт. Для более крупных оранжерей, например в упомянутом в главе 1 проекте NASA "BIOPlex", экономия мощности электропотребления могла бы составить десятки кВт, а экономия объема – десятки  $\text{м}^3$ . Как было отмечено, с конструктивной точки зрения для космических оранжерей с большой производительностью и, соответственно, с большими посадочными площадями, возможно, будет удобнее использовать не сферическую, а цилиндрическую или тороидальную компоновку вегетационной камеры. В условиях невесомости тороидальная форма может быть предпочтительнее, чем цилиндрическая, т.к. при одинаковой освещаемой поверхности она будет иметь меньший габаритный размер и может обеспечивать несколько большую энергетическую эффективность посева. В условиях же гравитации на планетарной базе или на Земле для салатных оранжерей, видимо, выгодно будет использовать цилиндрическую вегетационную камеру. При этом момент инерции, а следовательно, и энергозатраты на вращение такой оранжереи вокруг продольной горизонтальной оси для нейтрализации гравитропических реакций растений будут ниже, чем при других типах компоновки. Для больших производственных оранжерей в составе биорегенеративных систем жизнеобеспечения перспективным представляется использовать тороидальную посадочную поверхность. Окончательный выбор формы посадочной поверхности должен осуществляться с использованием критерия минимума эквивалентной массы для конкретной космической экспедиции.

Можно полагать, что организация самораздвигающихся посевов на выпуклых посадочных поверхностях станет в будущем важным средством для оптимизации характеристик космических оранжерей различного назначения.

### **5.5. Компьютерное моделирование фотосинтетической продуктивности посевов в оранжереях различной формы**

Как уже отмечалось, описание связи светового режима с продуктивностью посевов на основе приближенных аналитических зависимостей требует идентификации входящих в уравнения параметров, а также проверки полученных количественных результатов по результатам вегетационных экспериментов. В данном разделе изложена методика и результаты решения этих задач с использованием компьютерного моделирования процесса фотосинтетической продуктивности по результатам измерений характеристик в посевах растений.

#### **5.5.1. Модель фотосинтетической продуктивности самораздвигающегося посева на цилиндрической посадочной поверхности**

Модель фотосинтетической продуктивности посева на цилиндрической посадочной поверхности была построена на основе использованной в предыдущем разделе классической модели посева как "большого листа". Модель базировалась на следующих основных предположениях.

1) Листовая масса посева занимает все пространство между двумя коаксиальными цилиндрами: внутренним – посадочным цилиндром и внешним – цилиндрической поверхностью посева, аппроксимирующей концы побегов в посевах. При этом плотность распределения листовой поверхности аксиально симметрична и не зависит от координаты вдоль оси цилиндров.

2) Скорость фотосинтеза в любом объеме посева пропорциональна заключенной в этом объеме суммарной площади листовой поверхности.

3) Цилиндрический светильник над посевами состоит из большого числа равномерно распределенных по цилиндрической поверхности светонизлучающих диодов, которые по длине волны излучения разделяются на два типа – красные и синие.

При численном моделировании посевы разбивали на  $m$  цилиндрических слоев одинаковой толщины, а площадь листовой поверхности,  $S_j$ , заключенную в  $j$ -том слое ( $j = 1, 2, \dots, m$ ), считали равномерно распределенной по объему слоя. Интенсивность фотосинтеза

растений измеряли по скорости ассимиляции двуокиси углерода из окружающего воздуха. Выражение для скорости ассимиляции  $\text{CO}_2$  посевом растений мы представляли в виде:

$$F = \sum_{j=1}^m F_j(I_j) \cdot S_j, \quad (5.26)$$

где  $F_j(I)$  – удельная интенсивность фотосинтеза на единицу площади листа для листьев  $j$ -го слоя посева,  $I_j$  – средняя плотность потока фотонов в  $j$ -том слое;  $S_j$  – суммарная площадь фотосинтезирующей поверхности в  $j$ -том слое. Для характеристики облученности листьев посева использовали величину плотности потока фотонов, измеряемую в квантовых единицах  $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , а не облученность, измеряемую в  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ , в соответствии с обоснованием, данным в главе 3. Как следует из выражения (5.26), учитывали зависимость функции  $F_j$  только от одного аргумента – плотности потока фотонов, предполагая, что значения остальных параметров, влияющих на скорость фотосинтеза (температура и влажность воздуха, концентрация  $\text{CO}_2$  и т.д.), приблизительно одинаковы для всех листьев в посева. Это положение справедливо для космических оранжерей сравнительно небольшого объема, где интенсивная вентиляция обычно сводит градиенты параметров среды внутри посева до пренебрежимо малых значений.

Задача моделирования фотосинтеза посева складывалась, таким образом, из моделирования распределения  $I_j$  светового потока и распределения листовой поверхности,  $S_j$ , по глубине посева; кроме того, определяли параметры световой кривой  $F_j(I)$  для листьев в разных ярусах посева.

### 5.5.2. Модель распределения листовой площади по высоте посева

Распределение фотосинтезирующей листовой площади по высоте посева определяли экспериментально, срезая растения в корневом модуле в съемном возрасте послойно, начиная с верхушек. Толщина слоев была выбрана равной 5 см. В каждом слое измеряли суммарную площадь фотосинтезирующей листовой поверхности  $S$ . Данные этих измерений аппроксимировали зависимостью, рекомендованной в работе (Васильев А.А., 2002):

$$\left( \frac{S(x)}{s_0 \cdot x} - 1 \right) \times \left( \frac{S(x)}{s_0 \cdot \alpha \cdot (x_0 - x)} - 1 \right) = C, \quad (5.27)$$

где  $x$  – расстояние от посадочной поверхности,  $s_0$ ,  $x_0$ ,  $\alpha$  и  $C$  – постоянные. Зависимость  $S(x)$  дает возможность вычислить распределение  $S_j$  – листовой площади посева по слоям. Пример экспериментальных данных и их аппроксимации по формуле (5.27) для 30-дневного посева пекинской капусты приведен на рис. 5.14.

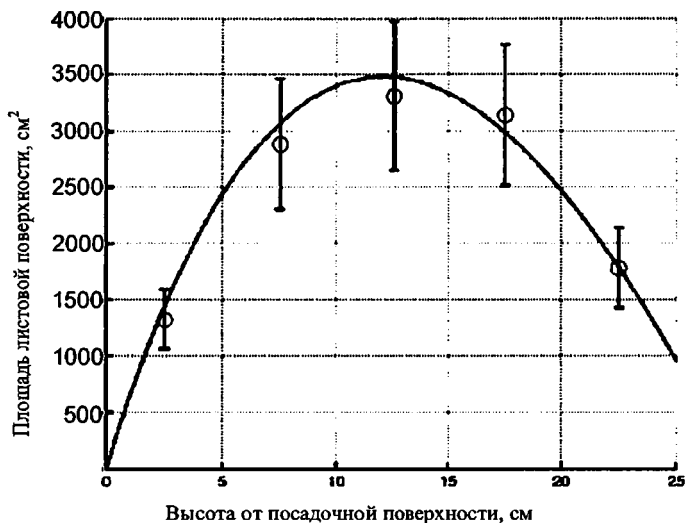


Рис. 5.14. Данные измерения распределения листовой площади по высоте в посевах пекинской капусты и их аппроксимация

Дальнейшее моделирование продуктивности посевов на цилиндрической и плоской посадочных поверхностях основано на предположении, что усредненное морфологическое строение одновозрастных растений в этих посевах одинаково, а следовательно, одинаково и распределение  $S(x)$  листовой площади по высоте. Как уже отмечалось выше, на любом шаге конвейерного посева на выпуклой посадочной поверхности листовой индекс  $L_n$  определяли как отношение суммарной листовой площади,  $\sum_j S_j$ , к площади освещаемой поверхности посева,  $S_n^L$ .

### 5.5.3. Модель светораспределения в посеве

Интенсивность излучения в каждой точке внутри посева рассчитывается как сумма плотностей потоков излучения от каждого светодиода светильника:

$$I = \sum_{i=1}^{N_r} I_{ri} + \sum_{i=1}^{N_b} I_{bi}; \quad (5.28)$$

$$I_{a_i} = Q_a \times \phi_a(\theta_i) \times \exp(-k\lambda_i \cdot) \times R_i^{-2}; \quad a = r, b; \quad (5.29)$$

где индексы r и b соответствуют красным и синим светодиодам соответственно; Ng и Nb – число светодиодов каждого типа; Qa – полная квантовая интенсивность излучения одного диода;  $\theta_i$  – угол между осью i-го диода и направлением от него в точку наблюдения;  $\phi_a(\theta_i)$  – функция углового распределения излучения; k – коэффициент экстинкции в посевах;  $R_i$  – расстояние от i-того светодиода до точки наблюдения в посевах;  $\lambda_i$  – оптическая толщина посева между точкой наблюдения и i-тым светоизлучающим диодом в светильнике. Оптическую толщину,  $\lambda_i$ , листового слоя на пути от i-го светодиода до точки наблюдения рассчитывали следующим образом:

$$\lambda_i = \sum_j \frac{S_j}{V_j} \delta_{ij}, \quad (5.30)$$

где  $V_j$  – объем j-го слоя посева,  $\delta_{ij}$  – длина отрезка прямой, соединяющей i-й светоизлучающий диод и точку наблюдения, лежащую в j-том слое посева.

При расчетах считали, что светильник состоит из нескольких удлиненных плоских плат с установленными на них светодиодами, причем платы расположены вдоль образующих на внутренней поверхности цилиндрического экрана. Полагали, что этот внешний, соосный с посадочным, цилиндрический экран имеет радиус, на 3 см больший, чем радиус освещаемой поверхности посева. Значение коэффициента экстинкции  $k = 0,30$  было определено путем сравнения результатов моделирования с результатами измерений светового потока в посевах. Количество слоев в посевах, m, при расчетах составляло от 15 до 30.

#### 5.5.4. Модель световой кривой фотосинтеза посева

При суммировании по j в выражении (5.26), в слоях посева с различными условиями освещения необходимо использовать различные световые кривые,  $F_j$ , поскольку листья, находящиеся в различных условиях освещения, могут по-разному реагировать на одно и то же изменение света. Полученная в соответствии с выражением (5.26) функциональная зависимость  $F(I)$  представляет собой как бы усредненную световую кривую всего посева при данном уровне и распределении по глубине посева светового потока, падающего на посев. Для экспериментального ее определения достаточно измерить в каждом слое посева интенсивность фотосинтеза  $F_j(I_j)$  при том значении светового потока  $I_j$ , который падает на листья именно в этом слое. В результате измерений, проведенных в посевах пекинской

капусты при значениях плотности падающего потока фотонов от 0 до 350 мкмоль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, был определен следующий вид усредненной световой кривой посева:

$$F(I) = \varepsilon_1 \cdot I - R_{d1} \text{ при } I < I_c; \quad (5.31)$$

$$F(I) = \varepsilon_2 \cdot I - R_{d2} \text{ при } I > I_c.$$

Здесь  $R_{d1} = 0,004 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ ;  $R_{d2} = 0,02 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$  – темновое дыхание листьев в тени и на свету, соответственно;  $\varepsilon_1 = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ мг CO}_2/\text{мкмоль}$ ,  $\varepsilon_2 = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ мг CO}_2/\text{мкмоль}$  – наклон световой кривой для листьев в тени и на свету соответственно;  $I_c = 52,6 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; световой поток  $I = I_c$  является так называемым "световым компенсационным пунктом", в окрестности которого видимый фотосинтез практически равен нулю.

### 5.5.5. Описание физической модели для идентификации математического описания конвейерных посевов

Приведенная выше компьютерная модель была использована для моделирования производительности цилиндрической конвейерной оранжереи «Фитоцикл СД». В расчетах в основном использовали значения параметров, соответствующие оранжерее «Фитоцикл СД» с посевом пекинской капусты. Наружный радиус цилиндрического блока корневых модулей составлял 10 см, высота посевов в возрасте от 15 до 30 дней – от 9 до 27 см. Платы со светодиодами, использованные в светильнике оранжереи, имели ширину 9 см, а длину – 54 см. Светодиоды на платах были расположены в 12 рядов по ширине платы по 44 шт. в ряду, всего 440 красных и 88 синих. Для светодиодов, использованных в установке «Фитоцикл СД», экспериментально были найдены следующие значения полных квантовых интенсивностей  $Q_a$  и выражения для функций углового распределения излучения при силе тока через диоды, равной 25 мА:

$$Q_r = 450 \text{ мкмоль/с}; \quad Q_b = 156 \text{ мкмоль/с};$$

$$\phi_r(\theta) = \phi_{0r} \cdot \cos^3(1,8 \cdot \theta), \quad \theta \leq \pi/3,6; \quad \phi_b(\theta) = \phi_{0b} \cdot \cos^{3,4}(2,0 \cdot \theta), \quad \theta \leq \pi/4. \quad (5.32)$$

Функции углового распределения были нормированы из условия  $\int \phi_a(\theta) d\Omega = 1$ , где  $d\Omega = 2\pi \cdot \sin\theta \cdot d\theta$ , откуда были получены значения  $\phi_{0r} = 1,96 \text{ ср.}$ ,  $\phi_{0b} = 2,60 \text{ ср.}$

Однако физическая модель посева для компьютерных расчетов имела ряд упрощающих отличий от реального посева в «Фитоцикл СД». Во-первых, мы считали дугу поперечного сечения цилиндрического экрана светильника в пределах каждого шага конвейерного посева не спиральной, как это имеет место в «Фитоцикл СД», а круговой и коаксиальной с блоком корневых модулей. Оценка ошибки от такого упрощения физической модели, как показали расчеты, не превышала 2–5 % от суммарного светового

потока, что не могло существенно повлиять на результаты расчета концентрирования светового потока в цилиндрической оранжерее. Во-вторых, конвейерный посев зеленных культур в "Фитоцикле СД" включал 10 шагов с продолжительностью выращивания растений на каждом, равной 72 ч, однако описываемая физическая модель учитывала прирост биомассы посева лишь на последних пяти шагах (с 6-го по 10-й), т.е. с 16 дня от посева семян. Причина состояла в том, что малые значения листового индекса в посевах до 5-го шага конвейера включительно не позволяли применить к этим посевам допущение об их "сомкнутости" и описывать их с помощью упомянутой выше модели "большого листа". Проведенные измерения массы салатных растений на 5-м шаге конвейера в опытах показали, что она составляла лишь несколько процентов от массы посева на 10 м шаге конвейера. Вследствие этого пренебрежение продуктивностью посева на первых шагах конвейера практически не могло повлиять на выводы, полученные при анализе продукционного процесса в посевах с 6-й по 10-й шаг конвейера. Характеристики посева в начале 6-го шага, такие как сырая биомасса побегов, суммарная площадь листьев, высота и другие, измеряли экспериментально и брали в качестве начальных условий при расчетах. Кроме того, при расчетах полагали, что все посева имеют одинаковую "стартовую" массу в начале 6-го шага конвейера.

Чтобы оценить влияние пространственной компоновки посева на его продуктивность, в том числе эффекта самораздвижения растений, растущих вдоль нормалей к цилиндрической посадочной поверхности (далее называем такой посев "цилиндрическим"), моделировали продуктивность идентичных по ряду параметров конвейерных посевов, выращенных на цилиндрической поверхности и на плоской посадочной поверхности (далее – "плоский посев"). В качестве плоского посева в модели использовали цилиндрический посев, у которого радиус посадочной поверхности в 30–40 раз превышал его высоту, что практически исключало влияние самораздвижения растений и обеспечило идентичность процедур моделирования для обеих форм посадочной поверхности.

#### **5.5.6. Оценка свойств самораздвигающихся посевов растений в салатной оранжерее методом компьютерного моделирования**

На рис. 5.15 представлены результаты расчета роста сырой биомассы на 6-м – 10-м шагах плоского и цилиндрического конвейерных посевов пекинской капусты, а также данные измерений сырой биомассы посевов пекинской капусты, выращенных в установке "Фитоцикл СД".

Полученные данные показали, что при одинаковом падающем световом потоке продуктивность конвейерного цилиндрического посева может превышать приблизительно

на 30 % продуктивность плоского посева. При варьировании радиуса цилиндрической установки, а также других используемых в модели параметров в пределах  $\pm 10\%$  от номинальных значений, указанная оценка повышения продуктивности в посевах на цилиндрической посадочной поверхности колебалась в пределах от 25 до 35 %. Таким образом, этот результат сопоставления продуктивности конвейерных посевов на плоской и цилиндрической посадочных поверхностях продемонстрировал хорошую устойчивость. Расчеты показали, что указанная разница в продуктивности цилиндрического и плоского посевов возникала, в основном, в результате различного распределения светового потока по их глубине. Графики зависимости плотности потока фотонов внутри посева от высоты над посадочной поверхностью представлены на рис. 5.16.

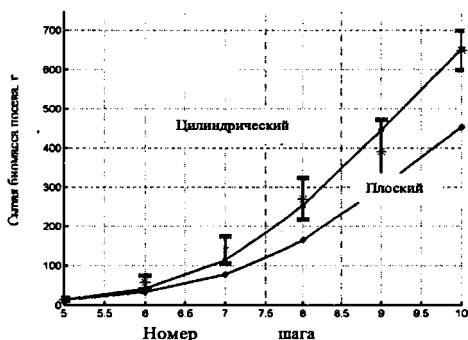


Рис. 5.15. Рост биомассы на 6–10-м шагах цилиндрического и плоского конвейерных посевов пекинской капусты. Экспериментальные данные показаны символом \*.

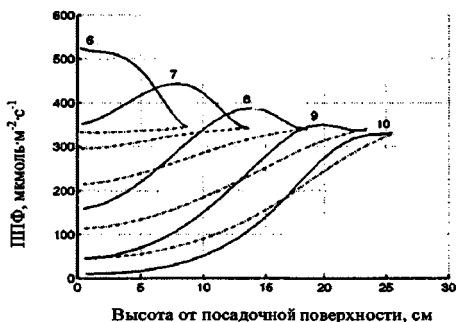


Рис. 5.16. Расчетные кривые светораспределения в конвейерных посевах пекинской капусты на цилиндрической и плоской посадочных поверхностях. Цифры у кривых обозначают номер шага конвейера. Сплошные и пунктирные кривые относятся соответственно к результатам в цилиндрическом и плоском посевах



Наиболее значительная разница в распределении света наблюдалась на 6, 7-м и 8-м шагах конвейерного посева. Данные рис. 5.16 свидетельствуют о том, что, в отличие от случая плоской вегетационной камеры, в цилиндрической камере происходит концентрация светового потока в направлении от светящей поверхности светильника к центральной ее оси. Сравнение светового потока в плоской и цилиндрической листовых камерах иллюстрирует также рис. 5.17.

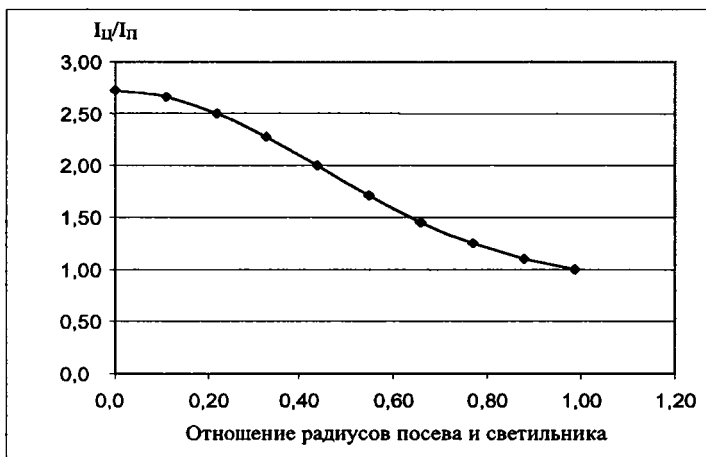


Рис. 5.17. Отношение вертикальных составляющих плотностей потоков фотонов на поверхностях посева цилиндрической и плоской компоновки,  $I_{\text{ц}}/I_{\text{п}}$ , в зависимости от отношения радиусов посева и светильника

При очень высоких значениях листового индекса в самораздвигающемся посеве на цилиндрической посадочной поверхности освещение нижних ярусов посева становится ниже светового компенсационного пункта, возрастает дыхание нижних листьев и фотосинтетическая продуктивность посева в целом понижается. В случае 30-дневной вегетации при плотности потока фотосинтетически активных фотонов, равной  $500 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , на 10-м шаге растительного конвейера КПД фотосинтеза понизился приблизительно на 13%.

Компьютерное моделирование по описанной модели позволяет совместно оптимизировать на этапе проектирования космических оранжерей выбор таких параметров, как плотность потока фотонов под светильником, фотопериод и густоту посадки семян или

листовой индекс. Например, это можно сделать, пользуясь описанным в главе 3 Q-критерием. На рис. 5.18 приведены результаты расчета Q-критерия на 6–10-м шагах конвейера для цилиндрического и плоского посевов при различных значениях плотности потока фотонов на поверхности посева.

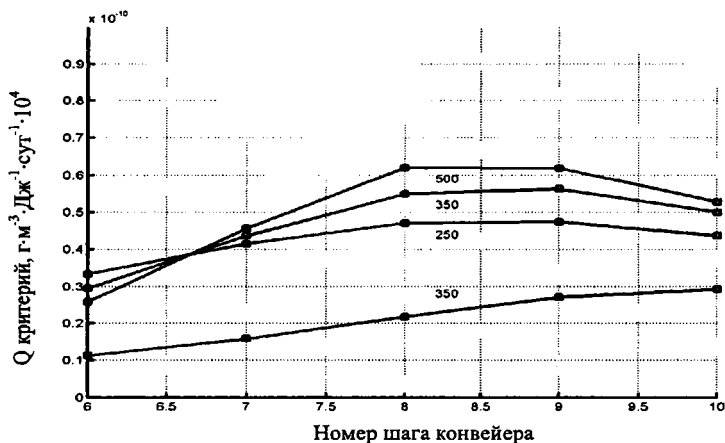


Рис. 5.18. Результаты расчета Q-критерия на 6–10 шагах цилиндрического конвейерного посева. Цифрами на графиках даны значения ППФ в  $\mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Нижняя кривая рассчитана для плоского посева

При облучении посевов с плотностью потока фотосинтетически активных фотонов, равной  $350 \mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ , удельная продуктивность в расчете на затраченные ресурсы при цилиндрической компоновке оказалась почти в 2 раза выше этого же показателя для плоского посева при выбранной густоте посадки растений. Максимальное значение Q-критерия для системы с цилиндрической компоновкой было отмечено на 9-м шаге конвейера, но к съемному возрасту растений эффективность оранжереи растений почти не изменилась (Q-критерий понизился лишь на 10 %). Снижение мощности освещения в цилиндрической оранжерее до  $250 \mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  привело к уменьшению Q-критерия приблизительно на 14 %. При более высокой – до  $500 \mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  плотности потока фотонов на поверхности посева в цилиндрической оранжерее возрастание Q-критерия на разных шагах конвейера оказалось неодинаковым. Максимум Q-критерия достигался на 9 шаге конвейера у растений в возрасте 27 дней, а к 10-му шагу отмечалось его заметное снижение. Эти результаты указывают на то, что при увеличении интенсивности освещения в

модельном посеве должна быть уменьшена оптимальная длительность вегетации. Об этом же свидетельствуют данные, приведенные на рис. 5.19, где показана зависимость фотосинтеза для того же цилиндрического посева от его листового индекса.

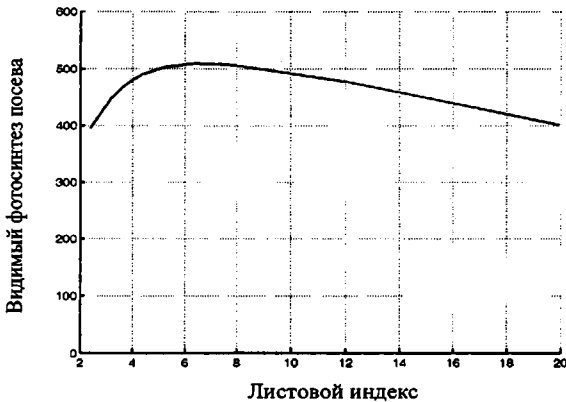


Рис. 5.19. Зависимость видимого фотосинтеза цилиндрического посева от его листового индекса при ППФ на поверхности посева, равном  $500 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Фотосинтез цилиндрического посева в данном случае был максимальным при значении листового индекса, близком к 6–7. К концу 10-го шага конвейера листовый индекс посева при выбранной освещенности достиг значений 15–17, причем оптимальной величины листовый индекс достиг значительно раньше 10-го шага конвейера.

Приведенные результаты, полученные с помощью компьютерного моделирования, позволили, например, установить, что на старших шагах растительного конвейера в оранжерее «Фитоцикл СД» наиболее выгодно поддерживать плотность потока фотосинтетически активных фотонов от светильника в пределах  $300\text{--}350 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Чтобы получить подобную оптимизацию параметров оранжереи с помощью чисто эмпирических методов, потребовалось бы поставить многофакторный эксперимент из многих десятков вегетационных опытов с огромными трудозатратами.

## 5.6. Основные результаты анализа свойств самораздвигающихся посевов растений

1. Разработанный способ оптимизации характеристик космических оранжерей за счет организации в них самораздвигающихся посевов растений на выпуклых посадочных поверхностях позволяет обеспечить существенное увеличение удельной производительности как на единицу объема вегетационной камеры, так и на единицу

потребляемой посевом растений энергии по сравнению с посевом на плоскости. Эффективность разработанного способа подтверждается расчетами оценки эффективности работы оранжерей по компромиссному Q-критерию, отражающему удельные затраты бортовых ресурсов космического корабля на единицу производительности оранжереи.

2. Выведенные нами уравнения кривых самораздвижения растений по мере их роста в посевах на различных выпуклых посадочных поверхностях позволяют обосновывать выбор компоновки космических оранжерей и рассчитывать густоту посадки в корневых модулях.
3. Новый класс космических оранжерей со сферической, цилиндрической и тороидальной формами выпуклых посадочных и светящихся поверхностей позволяет оптимизировать компоновку космической оранжереи для конкретных космических миссий. Для больших производственных космических оранжерей в условиях микрогравитации наиболее предпочтительна тороидальная компоновка, т.к. при одинаковой посадочной поверхности такая оранжерея имеет меньший габаритный размер и большую энергетическую эффективность, чем цилиндрическая, а ее посадочная поверхность не имеет ограничений, свойственных сферической оранжерее и связанных с габитусом культивируемых растений.
4. Организация самораздвигающихся посевов растений на сферической посадочной поверхности позволяет снизить объем вегетационной камеры приблизительно в 3 раза, а на цилиндрической и тороидальной посадочных поверхностях – в 2 раза по сравнению с объемом вегетационных камер в известных космических оранжереях с плоскими посадочными поверхностями.

## **ГЛАВА 6. СИСТЕМА КОРНЕВОГО СНАБЖЕНИЯ С РЕВЕРСИВНОЙ ВОДОПОДАЧЕЙ ЧЕРЕЗ ЗАПОРНУЮ МЕМБРАНУ ДЛЯ КОНВЕЙЕРНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ОРАНЖЕРЕИ**

### **6.1. Описание и принцип действия системы реверсивной подачи воды в корневые модули**

В настоящее время в исследовательских космических оранжереях испытаны два основных типа систем корневого снабжения: с принудительной подачей воды в корневой модуль по перфорированным трубкам с последующим распределением в слое почвозаменителя за счет капиллярных сил (оранжерея «Свет») и через водонасыщенную запорную мембрану с последующим распределением в слое почвозаменителя (оранжереи «Лада», РГВА, РГУ и др.). Анализ работы этих систем послужил основанием для разработки новой, более совершенной и универсальной, системы корневого снабжения с принудительной реверсивной водоподачей через запорную мембрану (Беркович и др., 1998). Чередование режимов подачи и откачки воды в предложенной системе позволяет увлажнять корнеобитаемую среду с последующей принудительной аэрацией, подобно тому, как это обычно происходит при поливе почвы с последующим гравитационным стоком свободной гравитационной воды в наземных условиях.

#### **6.1.1. Устройство системы реверсивной водоподачи для невесомости и наземных условий**

Принципиальная схема устройства разработанной системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей через запорную мембрану применительно к условиям невесомости изображена на рис. 6.1 (Беркович и др., 1998). Устройство включает герметичный резервуар 1, снабженный стабилизатором пониженного давления 2, например мембранным насосом или воздушным компрессором, который соединен всасывающим входом с атмосферой резервуара 1, а выходом обращен в открытую атмосферу. Резервуар 1 соединен двумя параллельными ветвями трубопроводов 3 и 4 с двумя концами пористой трубки – запорной мембраны 5. Запорная мембрана 5 погружена в капиллярно-пористый субстрат 6, помещенный в корпус 7 с посадочными отверстиями 8. В ветвь 3 трубопровода включен насос объемного дозирования 9, обращенный всасывающим входом к резервуару 1, а напорным выходом – к трубке 5. В ветвь 4 трубопровода включен кран 10, фильтр 11 для очистки от органических примесей и

жидкостной расходомер 12. Циклограмма работы исполнительных механизмов регулируется программатором 13.

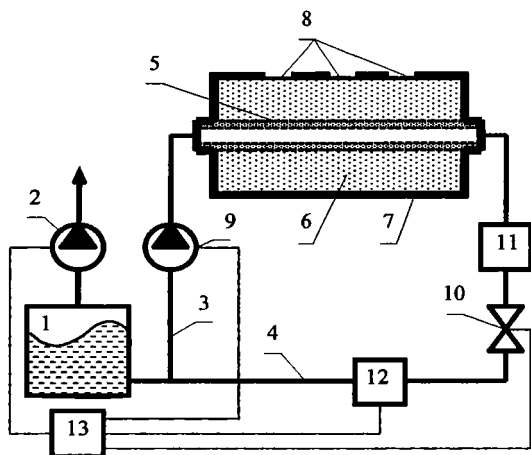


Рис. 6.1. Принципиальная схема устройства системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей в корневой модуль применительно к условиям невесомости. 1 – герметичный резервуар с разделительной эластичной мембраной; 2 – компрессор; 3, 4 – трубопроводы; 5 – мелкопористая трубка (запорная мембрана); 6 – капиллярно-пористый субстрат; 7 – корпус корневого модуля; 8 – посадочные отверстия; 9 – насос-дозатор; 10 – кран; 11 – фильтр; 12 – расходомер; 13 – программатор

Перед началом работы в резервуар 1 под мембрану заливают определенный объем воды. Работа начинается с включения воздушного компрессора 2 при выключенном насосе-дозаторе 9 и закрытом кране 10. Компрессор 2 настраивают на режим, обеспечивающий в резервуаре 1 разрежение меньшее по абсолютной величине, чем критическое давление пробоя запорной мембраны 5. Затем включают насос-дозатор, который подает дозу воды заданного объема в гидравлический контур устройства. Вода, поступающая через запорную мембрану 5 в капиллярно-пористую корнеобитаемую среду 6, заполняет часть объема пор, вытесняя из них воздух. После завершения подачи воды насос-дозатор 9 выключают, а кран 10 открывают. Из-за установившейся при работе компрессора 2 разности давлений между затопленным в предыдущем цикле гидравлическим контуром устройства и резервуаром 1 вода откачивается в резервуар по ветви трубопровода 4, освобождая часть пор в корнеобитаемой среде 6, в которые вместо

воды поступает свежий воздух из атмосферы. При этом вода, проходя через установленный в ветви 4 фильтр 11, очищается от растворенных органических примесей, накапливающихся в корнеобитаемой среде в результате метаболизма корней. Длительность периода откачки должна превышать длительность процесса перераспределения влаги в корнеобитаемой среде 6, в течение которого выравнивается давление во всех элементах устройства. При этом капиллярные силы в почвозаменителе удерживают воду на уровне заданного минимального водного потенциала, равного перепаду давлений между атмосферой и водой внутри запорной мембраны 5 и/или резервуаром 1. Далее описанные циклы закачки и откачки воды из почвозаменителя повторяются в течение всего периода выращивания растений.

В наземных условиях необходимо учитывать действие силы тяжести, что позволяет при разработке системы реверсивной подачи использовать более простые конструктивные элементы, например, отказаться от разделительной мембраны в резервуаре 1 (рис. 6.1). Кроме того, разрежение внутри пористой трубки корневого модуля можно создавать с помощью веса водяного столба, «подвешенного» к менискам жидкости в порах трубки. С учетом этого для работы в наземных условиях нами предложена относительно простая схема лабораторного макета системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей (рис. 6.2). В ней роль источника разрежения выполняет сливная трубка, нижний конец которой опущен на высоту  $H$  по отношению к горизонтальной оси пористой трубки в корневом модуле. Таким образом, внутри пористой трубки на уровне ее оси создается разрежение величиной  $\rho gH$  или отрицательный водный потенциал величиной  $-\rho gH$ . Здесь  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $H$  – высота столба воды от уровня оси корневого модуля до нижнего конца трубки. В макете предложено использовать сосуд Мариотта и мерную емкость со шкалой вместо резервуара для воды. Сосуд Мариотта позволяет автоматически восполнять/поддерживать минимальный уровень  $\Delta h$  в мерной емкости, несмотря на перекачку воды из нее в корневой модуль насосом-дозатором. Откачиваемая из корневого модуля вода поступает в мерную емкость и позволяет определять ее объем по разности уровней воды до начала и после окончания процесса откачки. Разность объемов воды, закаченных в корневой модуль насосом-дозатором и откаченных из него в мерную емкость, дает оценку объема воды, потраченной на эвакотранспирацию растений в посеве.

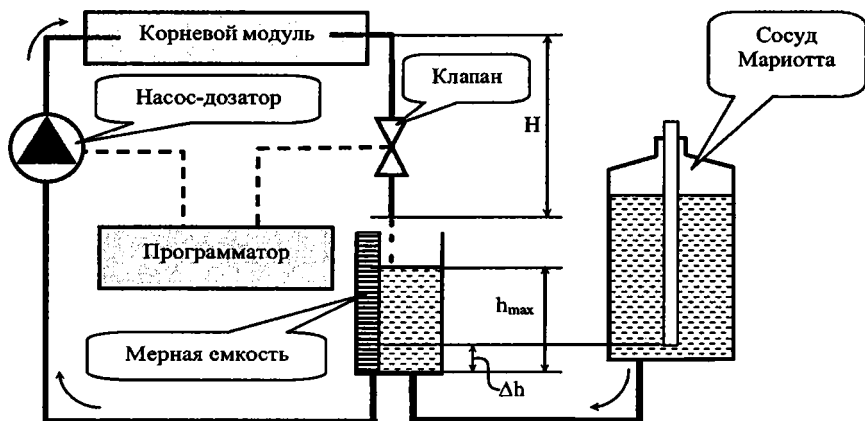


Рис. 6.2. Схема лабораторного стенда – макета системы корневого снабжения с реверсивной подачей воды.  $H$  – высота столба воды в сливной трубке, задающая разрежение в пористой трубке корневого модуля на уровне его оси;  $h_{\max}$  – максимальный уровень в емкости в конце слива воды из корневого модуля;  $\Delta h$  – минимальный уровень в емкости, задаваемый сосудом Мариотта

Конструкция макета позволяет периодически проводить контрольные замеры реальной длительности слива до равновесного состояния и максимально допустимого объема дозы закачиваемой воды. По этим данным можно в процессе вегетации растений проводить коррекцию длительности периода откачивания воды из корневого модуля и объема закачиваемой обратно воды, задаваемых программатором. Такие оценки необходимы в ходе разработки системы корневого снабжения, поскольку длительность периода откачки воды до наступления квазиравновесного состояния, а также характеристики влагоемкости корнеобитаемой среды в корневом модуле могут со временем меняться вследствие изменения гидрофизических свойств корнеобитаемой среды под воздействием развивающейся корневой системы, формирующейся микрофлоры и сопутствующих им физико-химических процессов в корнеобитаемой среде.

Экспериментальная проверка работоспособности предложенной системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей была проведена в вегетационных опытах с растениями (Беркович и др., 2000; Berkovich et al., 2002).



## 6.1.2. Циклограмма работы системы реверсивной водоподачи

На рис. 6.3 приведена циклограмма изменения водного потенциала в корневом модуле с учетом возможного поглощения воды растениями, разработанная нами для системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей. Циклограмма включает три фазы: I – закачку воды в корневой модуль, II – паузу и III – откачку воды из корневой модуля.

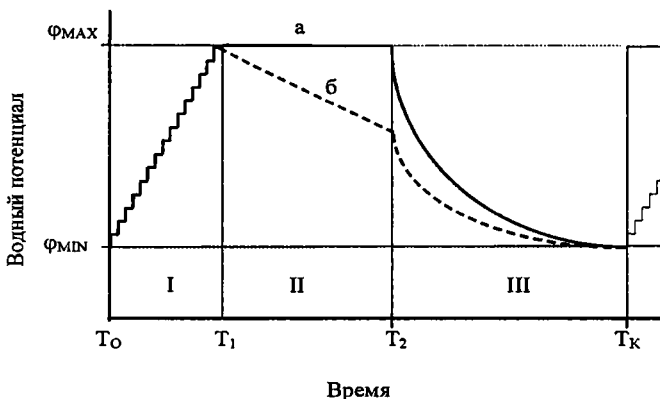


Рис. 6.3. Циклограмма изменения водного потенциала в цилиндрическом корневом модуле в системе корневого снабжения с реверсивной водоподачей. I – фаза закачки;  $T_1$  – конец фазы закачки; II – пауза: а – без транспирации; б – с транспирацией;  $T_2$  – конец паузы; III – фаза откачки;  $T_k$  – конец цикла;  $\Phi_{\text{MIN}}$  – минимальное значение ВП в цикле, то есть в начале фазы I и конце фазы III;  $\Phi_{\text{MAX}}$  – максимальное значение ВП в цикле после закачки

В фазе I в корневой модуль подается расчетная доза воды, вследствие чего величина водного потенциала в корнеобитаемой среде корневой модуля увеличивается от нижнего начального уровня  $\Phi_{\text{MIN}}$  до верхнего  $\Phi_{\text{MAX}}$ . Ступенчатый вид линии отражает порционный характер подачи воды поршневым насосом-дозатором. Чтобы в конце закачки в корневой модуль вода из него не протекала наружу, общий объем воды, подаваемой в фазе I, должен быть меньше разности между общей гравитационной

влажностью корнеобитаемой среды в корневом модуле и содержанием воды в нем перед началом закачки.

В фазе II вода убывает из корневого модуля вследствие испарения и транспирации растений. До появления проростков потери воды обусловлены лишь испарением с поверхности корнеобитаемой среды через посадочные отверстия в чехле, которые малы, так что объем воды и водный потенциал в корнеобитаемой среде практически не меняются (прямая а). По мере роста растений возрастает расход воды на их транспирацию, поэтому водный потенциал в корнеобитаемой среде на протяжении фазы II заметно снижается (линия б). Заметим, что при чрезмерной длительности фазы II транспирация приведет к тому, что, начиная с некоторого времени,  $T_{кр}$ , водный потенциал в почвозаменителе опустится ниже границы диапазона оптимальных водных потенциалов и корневая система окажется в неблагоприятных условиях. Отсюда следует, что длительность фазы II не должна превышать указанной величины  $T_{кр}$ .

В фазе III происходит откачка воды из корнеобитаемой среды при постоянном разрежении, равном начальному уровню водного потенциала  $\Phi_{МН}$ . Длительность фазы откачки должна быть достаточной для достижения равновесного распределения воды на уровне водного потенциала, равного  $\Phi_{МН}$ . В результате система приходит в исходное состояние и далее цикл повторяется.

Описанная система позволяет удерживать водный потенциал в корневом модуле в определенных пределах: от нижнего,  $\Phi_{МН}$ , соответствующего разрежению в резервуаре 1, до верхнего,  $\Phi_{МАХ}$ , устанавливающегося после закачивания воды в корневой модуль. Объем дозы воды, закачиваемой периодически в каждом цикле, может быть определен с помощью основной гидрофизической характеристики (ОГХ) почвозаменителя по разности водосодержания при верхнем и нижнем уровнях водного потенциала. Предложенная система позволяет обеспечить наиболее благоприятные условия в корнеобитаемой среде путем выбора величин  $\Phi_{МН}$  и  $\Phi_{МАХ}$  в пределах диапазона оптимальной влажности. Надежность аэрации корнеобитаемой среды в данной системе корневого снабжения обеспечена, помимо диффузии, принудительной конвекцией газа в порах аэрации при циклических колебаниях влажности. Кроме того, описанная система позволяет удалять растворенные метаболиты из корнеобитаемой зоны при использовании в системе фильтра органических примесей 11 (рис. 6.1).

### 6.1.3. Критериальные соотношения между параметрами системы реверсивной водоподачи

Определим теперь соотношения между параметрами работы системы реверсивной водоподачи, которые связывают изменения водосодержания в корневом модуле в разных фазах циклограммы с длительностями фаз. Введем обозначения:

$V_0$  – содержание воды в корневом модуле в начале фазы I перед закачкой;

$V_d$  – объем дозы воды, закачиваемой в корневой модуль в фазе I;

$V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$  – содержание воды в корневом модуле в конце фаз I, II и III соответственно;

$v$  – общее количество воды, расходуемое на эвапотранспирацию растений и испарение с поверхности за единицу времени;

$T_1$  и  $T_{II}$  – длительности фаз I и II.

Содержание воды в корневом модуле после закачки – в конце фазы I – складывается из первоначального объема,  $V_0$ , и объема дозы,  $V_d$ , за вычетом израсходованной воды за время этой фазы:

$$V_1 = V_0 + V_d - v \cdot T_1. \quad (6.1)$$

Содержание воды в корневом модуле в конце фазы II образуется из начального объема,  $V_1$ , за вычетом израсходованной воды за время этой фазы:  $V_2 = V_1 - v \cdot T_{II}$ , или:

$$V_2 = V_0 + V_d - v \cdot T_1 - v \cdot T_{II}. \quad (6.2)$$

Отсюда сумма длительностей фаз I и II равна:

$$T_1 + T_{II} = (V_0 + V_d - V_2)/v. \quad (6.3)$$

Поскольку после фазы II следует фаза откачки до уровня начального водосодержания,  $V_0$ , то очевидно, что при нормальной работе системы реверсивной водоподачи конечный уровень содержания воды в корневом модуле в конце фазы II должен быть больше начального в фазе I на величину суммы объемов транспирационной и испаряемой, а также откачиваемой или сливаемой в фазе III воды:  $V_2 = V_0 + T_{III}/v + V_{сл}$ . Поэтому для длительности цикла, состоящего из суммы фаз I, II и III, вытекает условие:

$$T_1 + T_{II} + T_{III} = (V_d - V_{сл})/v. \quad (6.4)$$

Из этого условия видно, что длительность цикла работы системы реверсивной водоподачи ограничена соотношением (6.4) и в общем случае может меняться с изменением транспирации в процессе роста растений. На практике же для простоты управления удобнее выбирать постоянную длительность цикла с учетом максимальной транспирации растений.

Длительность фазы III, или длительность переходного процесса откачки воды из корневого модуля, зависит от ряда его конструктивных параметров, подробно рассмотренных ниже.

## **6.2. Система корневого снабжения для конвейерной космической орощерен с цилиндрической посадочной поверхностью**

### **6.2.1. Конструкция корневого модуля**

В качестве корнеобитаемой среды для разработанной системы реверсивной водоподачи был использован почвозаменитель БИОНА-ВЗ – соленасыщенный волокнистый ионообменный материал в виде петканого полотна. Сочетание такой корнеобитаемой среды с запорной мембраной в виде мелкопористых пластин или трубок позволило предложить два наиболее простых варианта конструкции корневого модуля, обеспечивающих надежный гидравлический контакт между поверхностями прилегающих пористых элементов:

1) корневого модуль в виде прямоугольного контейнера с жестким корпусом, в который вмонтировано второе дно, представляющее собой плоскую запорную мембрану. На это дно уложен слоями почвозаменитель, который сверху покрыт крышкой или чехлом с прорезями для посадки растений. Корпус корневого модуля ниже запорной мембраны снабжен штуцерами для подвода/отвода воды в корневого модуль через подмембранное пространство.

2) корневого модуль цилиндрической формы в виде рулона из полотна почвозаменителя, намотанного поверх пористой трубки, на концах которой установлены штуцеры для подвода/отвода воды. Сверху корневого модуль покрыт защитным чехлом с прорезями для посадки растений.

Для дальнейшей разработки системы реверсивной водоподачи была выбрана цилиндрическая конструкция корневого модуля как более простая и не требующая жесткого корпуса (рис. 6.4).

В такой конструкции листовой волокнистый почвозаменитель намотан в виде валика 1 на пористую трубку 2, например, из пористой керамики, металлокерамики или поропласта. Для уменьшения засорения пор пористой трубки твердыми частицами она обтянута однослойным гидрофильным фильтром-чехлом 3 из гидрофильного синтетического полотна. Снаружи валик 1 покрыт светонепроницаемым чехлом 3,

например, из черного полиэтилена, алюминиевой фольги и т. п. На концах пористой трубки 2 установлены штуцеры 6 для подсоединения шлангов подачи воды.

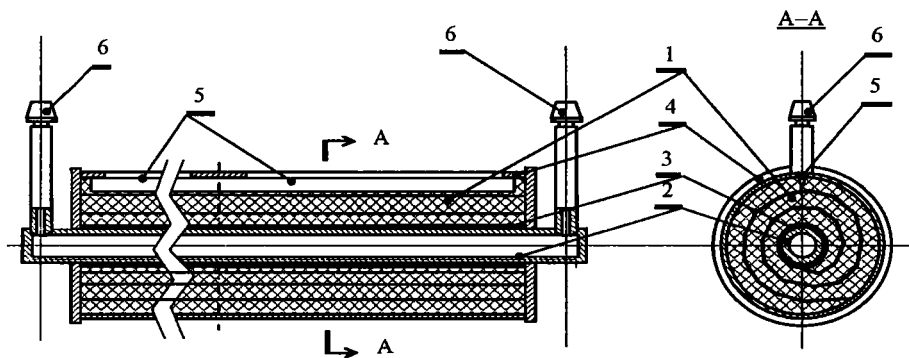


Рис. 6.4. Схема устройства цилиндрического корневого модуля. 1 – валик из волокнистого почвозаменителя, например «БИОНА-В3»; 2 – пористая, например, металлокерамическая титановая трубка; 3 – фильтр-чехол из ткани хлоринвискозы; 4 – чехол из алюминиевой фольги; 5 – щелевая прорезь для посадки семян; 6 – штуцера

Вдоль верхней кромки чехла 4 и валика 1 имеется продольная прорезь 5 для посадки семян. Для уменьшения трудозатрат и предотвращения разноса семян воздушными потоками по кабине в условиях космического полета в конструкции корневого модуля предусмотрены посадочные планки с наклеенными семенами растений. Посадочные планки с семенами различных зеленных культур могут находиться на борту космического корабля в специальной укладке, с тем чтобы оператор мог выбрать нужную, вставить в прорезь 5 валика и закрепить специальными фиксаторами.

Посев 30-дневных растений салата, выращенных на цилиндрическом корневом модуле с почвозаменителем марки «БИОНА-В3», представлен на рис. 6.5 (внешний чехол снят для наглядности). На срезе сечения видны слои почвозаменителя и отдельные корешки, пронизывающие толщу субстрата. Часть корней прошла сквозь валик субстрата насквозь и оплела его нижнюю кромку под чехлом, образовав своеобразный мат-«косичку».

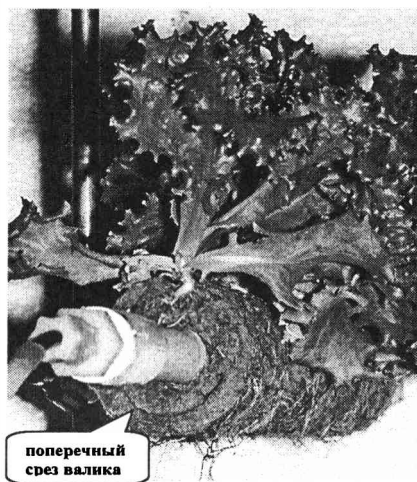


Рис. 6.5. Листовой салат в возрасте 30 дней (*Lactuca sativa* L.) на срезанном поперек валике «Биона-ВЗ»

### 6.2.2. Устройство блока корневых модулей для конвейерной цилиндрической оранжереи

Одним из основных отличий производственной космической оранжереи является конвейерный режим выращивания урожая. При конвейерном режиме посев в оранжерее поделен на отдельные доли – шаги конвейера – каждый из которых занимает отдельный корневой модуль. Разрабатываемая нами производственная космическая оранжерея является цилиндрической, в которой все корневые модули в совокупности в собранном виде образуют квазицилиндрический посадочный блок, именуемый в дальнейшем блоком корневых модулей. Например, блок корневых модулей в наземных конвейерных оранжереях «Фитоцикл», «Фитоцикл СД» и наземном экспериментальном образце космической оранжереи «Витацикл» представляет собой десятигранную призму, собранную из 10 отдельных корневых модулей с трапецидальным сечением. При соосном размещении такого блока корневых модулей со светильником цилиндрической формы побеги растений в условиях микрогравитации ориентированы радиально относительно оси блока корневых модулей, что обеспечивает их раздвижение по мере роста.

В общем случае количество корневых модулей для космической оранжереи подобной конструкции может быть определено на основании исходных требований к длительности периода между получением урожая в оранжерее и к величине урожая на каждом шаге конвейера, что, в свою очередь, определяется нормами потребления выращиваемых культур, длительностью товарной вегетации и возможными габаритными ограничениями в отсеке космического летательного аппарата. В установке «Фитоконвейер» с учетом заданных габаритных размеров количество корневых модулей в блоке было принято равным шести. На рис. 6.6 показана компоновка космической оранжереи «Фитоконвейер».

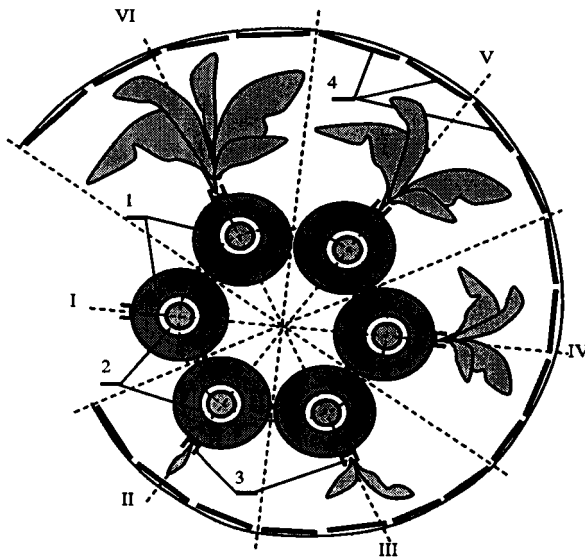


Рис. 6.6. Схема компоновки блока корневых модулей в конвейерной оранжерее «Фитоконвейер». 1 – валики корневых модулей; 2 – пористые трубки (запорные мембраны); 3 – посадочные щели в чехлах; 4 – панели светильников; I – VI – позиции шагов конвейера

Форма направляющей спирали для светильника конвейерной салатной оранжереи с цилиндрическими корневыми модулями отражает кривую роста культивируемых

растений в процессе вегетации. В наземных макетах конвейерной космической оранжереи необходимо непрерывное вращение вегетационной камеры вместе с блоком корневых модулей вокруг горизонтальной оси для предотвращения гравитропического искривления побегов. В этом случае растения будут ориентированы по градиенту светового поля в вегетационной камере, который близок к радиальному. Оптимальный срок выращивания зеленных культур в наших опытах составляет около 30 сут. При шести корневых модулях уборка урожая с очередного шага конвейера будет производиться каждые пять дней.

Посев, выращивание и съем растений в шестишаговой оранжерее осуществляют следующим образом. Первый засеваемый корневой модуль устанавливают на 1-ю позицию конвейера (1-й шаг конвейера) напротив технологического люка оранжереи и вставляют в него (в посадочную щель между слоями почвозаменителя) планку с семенами. Через пять дней (период, равный  $1/6$  длительности товарной вегетации) корневой модуль с посевом переводят во 2-ю позицию, поворачивая его вместе с блоком корневых модулей на  $60^\circ$  относительно вегетационной камеры, а во 2-м корневом модуле, переместившемся на 1-ю позицию, устанавливают посадочную планку с семенами. Еще через пять дней блок корневых модулей опять поворачивают на  $60^\circ$ , и на 1-й позиции засеивается 3-й корневой модуль. Через время, равное длительности товарной вегетации, все 6 корневых модулей будут засеяны, а в 1-м корневом модуле на 6-й позиции (6-м шаге конвейера) растения достигнут товарной спелости. Тогда 1-й корневой модуль переводят из 6-й позиции в 1-ю, убирают растения, а в модуль помещают новую посадочную планку с семенами в свободную щель между слоями почвозаменителя. Далее операции повторяют каждые пять дней, получая, соответственно, каждые пять дней урожай зеленных культур. Работа такой оранжереи может продолжаться непрерывно, если при уборке растений через определенное число вегетаций в каждом корневом модуле заменять отработавший почвозаменитель на новый.

Очевидно, что для обеспечения адекватного увлажнения и аэрации корневой системы для каждого корневого модуля необходимо реализовать циклограмму регулирования водного потенциала в соответствии со схемой (рис. 6.3). С этой целью был разработан соответствующий блок водообеспечения для системы корневого снабжения космической оранжереи.



### 6.2.3. Гидравлическая схема и циклограмма работы блока водообеспечения для конвейерной цилиндрической оранжереи

Основой гидравлической схемы и циклограммы работы блока водообеспечения для системы корневого снабжения конвейерной оранжереи явилась схема устройства реверсивной водоподачи в один корневой модуль (рис. 6.1). При анализе возможных решений задачи по выбору структуры блока водообеспечения для системы корневого снабжения учитывали следующие соображения.

Во-первых, структура блока водообеспечения должна гарантировать достаточный уровень надежности работы при заданных ограничениях на габаритно-весовые характеристики блока. Надежность блока водообеспечения зависит в первую очередь от количества насосов-дозаторов, обслуживающих блок корневых модулей. Увеличение количества насосов в структуре блока водообеспечения, с одной стороны, увеличивает надежность его работы, а с другой – повышает суммарную массу и объем конструктивных элементов. Во-вторых, работа исполнительных механизмов блока водообеспечения не должна зависеть от силы тяжести. В-третьих, блок водообеспечения должен работать в автоматическом режиме, обеспечивая реверсивную водоподачу в корневые модули как на этапе разгона растительного конвейера, так и в стационарном режиме; при этом должны быть предусмотрены средства контроля за уровнем водных потенциалов во всех корневых модулях с соответствующими средствами сигнализации о возникновении нештатных ситуаций. В-четвертых, конструкция блока водообеспечения должна обеспечить возможность отсоединения и подсоединения корневых модулей для замены отработавшего почвозаменителя без нарушения герметичности гидравлической схемы, а также возможность освобождения гидравлического контура от появляющихся в нем в ходе работы воздушных пузырьков, способных в случае их накопления нарушить работу блока. Наконец, в составе блока водообеспечения желательно иметь емкость с запасом воды, достаточным для обеспечения растений водой в течение как минимум пяти суток для снижения трудозатрат по дозправке оранжереи водой и на случай нештатных ситуаций. В качестве комплектующих в составе блока водообеспечения желательно применять исполнительные механизмы и комплектующие, прошедшие проверку в ранее созданных гидравлических узлах и блоках систем жизнеобеспечения на ОК «Мир» и МКС, что гарантировало бы их надежность и работоспособность в составе блока водообеспечения космической оранжереи.

Учитывая положительный опыт использования электрогидравлических исполнительных элементов, разработанных организациями отечественного промышленно-космического комплекса в системе жизнеобеспечения российского ОК «Мир», было принято решение использовать их и в разрабатываемой конструкции блока водообеспечения. В частности, в качестве насоса-дозатора был применен поршневой насос-дозатор типа МН-15 с величиной дозы 15 мл и периодичностью хода 4 с, в качестве источника разрежения – насос мембранный типа Щ03, а в качестве средства коммутации гидравлических магистралей – импульсный двухпозиционный электроклапан типа УФ 96 259.

Одним из наиболее важных элементов структуры блока водообеспечения является источник разрежения в гидравлическом контуре, обеспечивающий откачку воды из корневого модуля как на Земле, так и в невесомости. В качестве такого источника могут быть использованы устройства, включающие управляемый побудитель разрежения в газовой или жидкой фазе в паре с датчиком давления в контуре обратной связи (компрессором или вакуумным насосом). Однако такие устройства сложны, недостаточно надежны и являются источниками дополнительных шумов. Вследствие этого были выбраны мембранные насосы с калиброванными пружинами, разработанные в Научно-исследовательском институте химического машиностроения г. Москвы для решения аналогичных задач для системы жизнеобеспечения ОК «Мир». Для удаления газовых пузырьков из водных магистралей в схеме предусмотрен статический разделитель на пористых гидрофильных трубках, а для сглаживания импульсов давления при работе насоса-дозатора – мембранный ресивер-аккумулятор.

Анализ различных вариантов структуры блока водообеспечения с упомянутыми комплектующими выявил возможность создания устройства с одним насосом-дозатором в паре со специальным поворотным жидкостным распределителем, позволяющим соединить входную и выходную магистрали блока водообеспечения с любым корневым модулем путем поворота коммутационного диска. Гидравлическая схема блока водообеспечения позволяет, таким образом, использовать минимальное количество исполнительных механизмов за счет поочередной реверсивной водоподачи во все корневые модули оранжерен и тем самым существенно минимизировать вес и объем системы (рис. 6.7).

Основные режимы или операции работы разработанной схемы приведены в табл. 6.1 с указанием положения электромагнитных клапанов, пронумерованных на схеме (рис. 6.7).

Циклограмма работы блока водообеспечения поясняет его действие в системе корневого снабжения оранжереи с шестью корневыми модулями (рис. 6.8). Согласно разработанной циклограмме, в течение II фазы – паузы между закачкой и откачкой воды в любом корневом модуле – блок водообеспечения осуществляет поочередно откачку и закачку воды во всех остальных корневых модулях. Из приведенной циклограммы видно, что при ее осуществлении суммарное время фаз откачки и закачки воды в любом корневом модуле по крайней мере в 5 раз меньше длительности паузы между этими фазами. Таким образом, организация цикла поочередного обслуживания шагов растительного конвейера в оранжерее с описанной системой корневого снабжения возможна при выполнении условия:

$$T_1 + T_{III} < T_{II} / 5. \quad (6.5)$$

Выражения (6.5) и (6.4) показывают, что длительности фаз циклограммы связаны как друг с другом, так и с величиной дозы воды, подаваемой в корневой модуль при закачке, и с интенсивностью потребления воды растениями. Интенсивность водопотребления, в свою очередь, зависит от видовых и/или сортовых особенностей выбранной культуры, возраста растений, длительности вегетации и других факторов, определяющих массу посева в корневом модуле. При выборе параметров циклограммы работы системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей следует добавить необходимость учета нестационарности характеристик корнеобитаемой среды в процессе вегетации. Следующий раздел главы посвящен экспериментальному и расчетному обоснованию основных конструктивных и режимных параметров системы корневого снабжения с периодической реверсивной водоподачей для конвейерной космической оранжереи.

Таблица 6.1  
Основные операции и действия исполнительных механизмов при работе блока водообеспечения в системе корневого снабжения

Назначение операции	Исполнение операции	Положение клапанов по их номерам						
		1	2	3	4	5	6	7
Подпитка водой НМ2	Закачка НД из ЕР	-	-	-	+	-	-	+
Закачка воды в КМ	Закачка НД из НМ2	-	-	+	-	+	-	-
Откачка воды из КМ	Откачка НМ1 из КМ	+	-	-	-	-	-	-
Прокачка магистрали с КМ	Прокачка НД из НМ2 через КМ в НМ1	+	-	+	-	+	-	-
Откачка воды из НМ1	Перекачка НД в НМ2	-	+	-	-	-	-	+
Откачка воды из НМ1 с сепарацией газа	Перекачка НД через РС в НМ2	-	+	-	-	-	+	-

Примечание. «+» – клапан открыт; «-» – клапан закрыт.

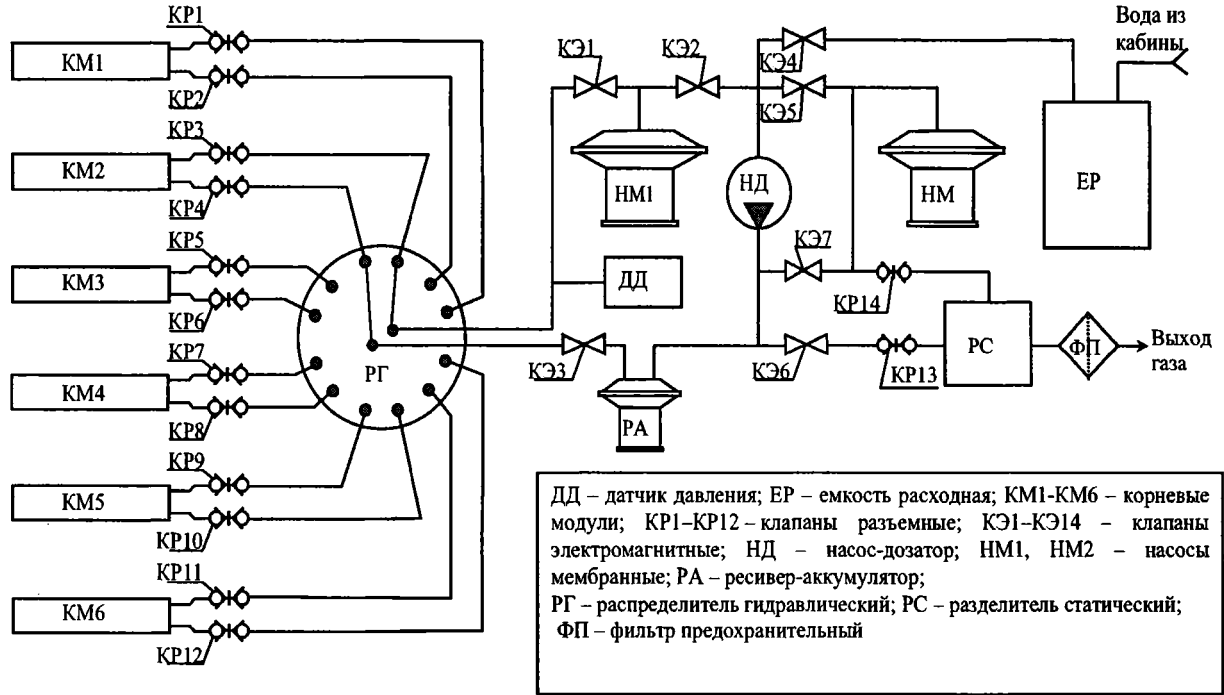


Рис. 6.7. Гидравлическая схема для поочередной реверсивной водоподачи в шесть cornerных модулей системы cornerного снабжения конвейерной оранжереи

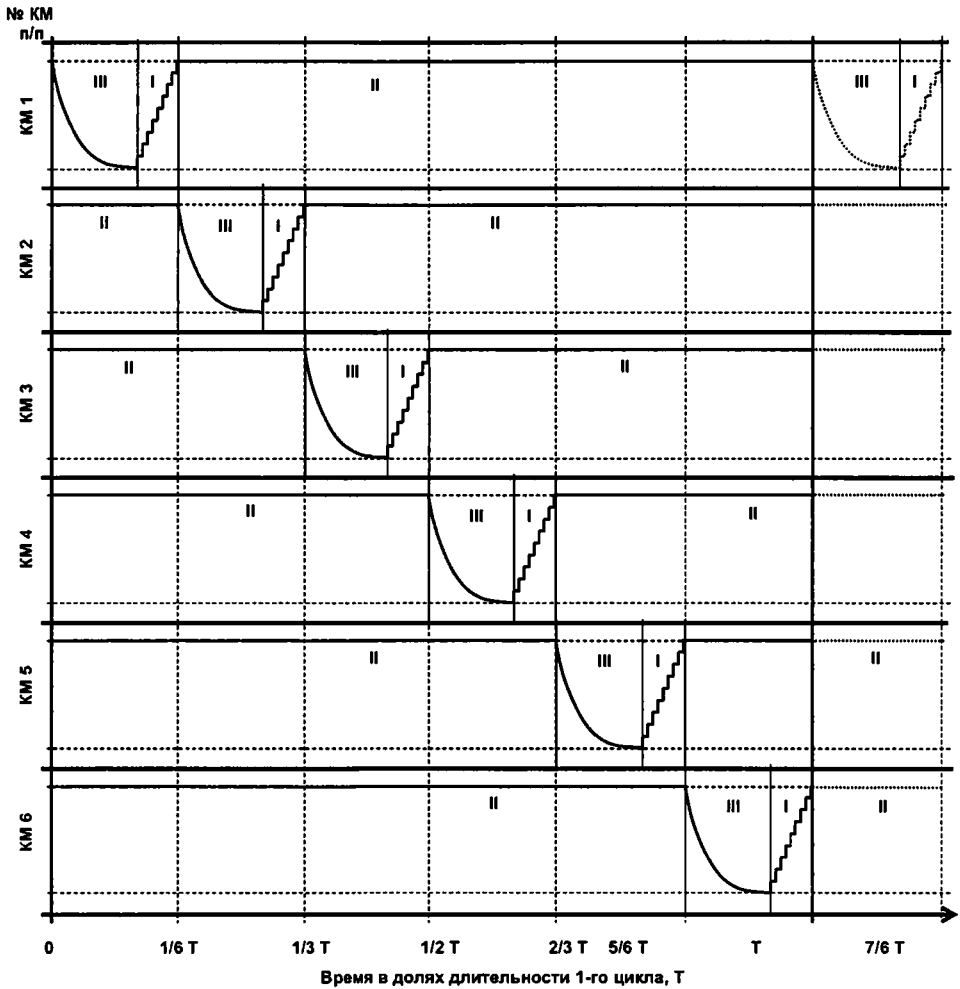


Рис. 6.8. Циклограмма изменения водных потенциалов в шести корневых модулях, обслуживаемых блоком водообеспечения с системой поочередной реверсивной водоподачи. I – фаза закачки; II – фаза паузы; III – фаза откачки

### 6.3. Расчет параметров системы корневого снабжения для цилиндрической конвейерной оранжереи

#### 6.3.1. Оптимизация параметров системы корневого снабжения

В соответствии с описанными выше принципами работы СКС с реверсивной водоподачей и устройством корневых модулей ниже в табл. 6.2 даны ее основные характеристики.

Таблица 6.2

Основные характеристики системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей

Характеристика	Описание
Физическая структура корнеобитаемой среды	Матричная волокнистая среда
Способ депонирования нутриентов в корнеобитаемую среду	Насыщение солями твердых ионообменников
Способ увлажнения корнеобитаемой среды	Закачивание доз воды заданного объема
Способ аэрации корнеобитаемой среды	Диффузия и конвекция за счет поочередного закачивания и откачивания воды

Цилиндрические корневые модули системы оснащали пористыми трубками из особого вида поропласта – пенополивинилформала (ППВФ), поверх которых наматывали волокнистый ионообменный соленасыщенный искусственный почвозаменитель марки «БИОНА-В3», обладающий необходимыми гидрофизическими и агрохимическими характеристиками (см. главу 3). Основным преимуществом ППВФ перед другими мелкопористыми материалами являлась более высокая пористость (~80 % об.) при достаточной величине давления пробоя.

Как уже было показано, для установления рабочего режима системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей необходимо определить следующие параметры:

- 1) величину дозы воды, закачиваемой в корневой модуль;
- 2) длительность периода закачки воды в корневой модуль;
- 3) длительность паузы между закачкой и откачкой воды из корневого модуля;
- 4) длительность периода откачки воды из корневого модуля;
- 5) величину разрежения (водного потенциала) внутри пористой трубки в период откачки воды из корневого модуля, равную равновесному водному потенциалу в почвозаменителе в конце откачки;
- 6) водосодержание в корневом модуле в начале закачки или конце откачки воды.

Водосодержание в корневом модуле при постоянном значении водного потенциала, как было отмечено, можно оценить по основной гидрофизической характеристике для

выбранной корнеобитаемой среды. Что же касается распределение влажности и/или водного потенциала в почвозаменителе, то оно может зависеть как от формы корневого модуля, так и от его размеров. В частности, распределение водных потенциалов в цилиндрическом корневом модуле зависит от диаметра пористой трубки и диаметра субстратного валика, причем это распределение различно при наличии и отсутствии силы тяжести. Кроме того, гидрофизические характеристики почвозаменителя и, в частности, ОГХ могут изменяться в процессе использования, что также должно повлиять на распределение влажности и/или водного потенциала по объему почвозаменителя в корневом модуле. Следовательно, в процессе использования почвозаменителя неизбежно изменятся, согласно уравнениям (6.1)–(6.5), параметры системы корневого снабжения. Для теоретической оценки адекватных условий в корнеобитаемой среде была использована модель влагопереноса в пористой среде корневых модулей цилиндрической формы при стационарном и нестационарном режимах влагопереноса, учитывающая влияние силы тяжести. Разработка модели была описана в главе 3. С помощью модели влагопереноса в цилиндрическом слое была проведена оценка адекватности водовоздушного режима в корневых модулях с полученными расчетным путем характерными размерами. Адекватность самой модели была проверена экспериментально. Подробно эти исследования описаны в данной главе ниже. В качестве критерия оптимальности распределения влажности и/или водного потенциала в корневом модуле было принято условие нахождения значения водного потенциала в пределах границ оптимального диапазона водных потенциалов в любой точке корневого модуля и в любой момент времени. Для волокнистых почвозаменителей в цилиндрических корневых модулях оптимальным диапазоном водных потенциалов явился, по нашей оценке, диапазон от  $-0,5$  до  $-2,5$  кПа.

### **6.3.2. Идентификация математических моделей движения воды в корневых модулях с пористым почвозаменителем**

Для численных вычислений по общему уравнению движения воды (3.51) необходимо было оценить эмпирические зависимости содержания воды в почвозаменителе от водного потенциала,  $W(P)$ , и коэффициента влагопроводности ненасыщенного влагой почвозаменителя от величины водного потенциала,  $K(P)$ , характеризующие гидрофизические свойства почвозаменителя. Экспериментальное исследование основной гидрофизической характеристики почвозаменителя, а также переходных процессов откачки воды из цилиндрического корневого модуля после скачкообразного уменьшения давления внутри пористой трубки проводили на стенде, схема которого представлена на рис. 6.9 (Беркович и др., 1997).

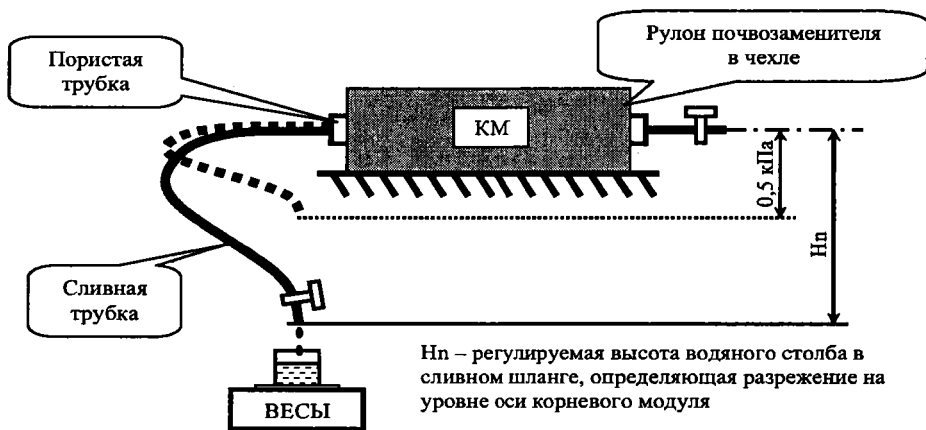


Рис. 6.9. Схема стенда для исследования основной гидрофизической характеристики почвозаменителя в цилиндрическом корневом модуле

Стенд был оснащен корневым модулем цилиндрической формы с пористой трубкой из ППВФ с диаметром 24,5 мм и диаметром осевого отверстия 7 мм. Поверх трубки был намотан валик из почвозаменителя «БИОНА-В3», покрытый снаружи защитным чехлом из полиэтилена. Наружный диаметр корневой модуля составил ~60 мм, а длина равнялась 254 мм. Оба конца пористой трубки были соединены со сливными шлангами с кранами. Перед сборкой корневой модуль был определен вес всех его элементов. В частности, вес почвозаменителя составил 73,6 г, а вес пористой трубки – 17,9 г. Перед началом измерений пористую трубку и шланги заполняли водой, выдерживая корневой модуль в ванне с дистиллированной водой в течение 2 сут. Затем краны закрывали и корневой модуль помещали на горизонтальную площадку. Одну из сливных трубок опускали и закрепляли так, чтобы ее конец был на 50 мм ниже оси корневой модуля. Затем открывали сливной кран и выжидали 2–3 ч до окончания стока воды и установления равновесного состояния, после чего сливной кран закрывали, считая, что значение водного потенциала на уровне оси пористой трубки равно  $-0,5$  кПа. После этого пористую трубку устанавливали над сборной емкостью для воды, стоящей на весах, и опускали конец сливного шланга на 150 мм ниже оси пористой трубки, после чего снова открывали кран. Высота водяного столба, равная разности уровней нижнего конца сливного шланга и оси корневой модуля, определяла величину равновесного разрежения, т. е. величину водного потенциала на уровне оси



корневого модуля. При открытом кране на сливном шланге вода из корневого модуля стекала в емкость для сбора воды. Показания весов регистрировали с указанием времени от начала стока. Опыт был повторен при уровнях разрежения на уровне оси корневого модуля, равных -0,5; -1,0; -1,5; -2,0; -2,5 и -3,0 кПа.

Основная гидрофизическая характеристика волокнистого почвозаменителя «БИОНА-ВЗ» была построена по экспериментальным точкам зависимости содержания воды в почвозаменителе от уровня водного потенциала,  $W(P)$ , при допущении, что система находится в равновесии на выбранных экспериментальных уровнях разрежения и что на начальном уровне все поры заполнены водой, т. е. относительная влагоемкость составляет 100 % (рис. 6.10). Массу воды на уровне разрежения, равном -0,5 кПа, определяли весовым методом по разности веса корневого модуля в конце слива и суммарного веса сухого субстрата и заполненных водой пористой трубки и шлангов с кранами (~185 г). Эта разность составила ~539 г, что соответствует средней объемной влажности в почвозаменителе ~86 %. Остальные точки основной гидрофизической характеристики определяли с помощью капилляриметра по стандартной методике (Воронин, 1986).

ОГХ, изображенную на рис. 6.10, аппроксимировали по экспериментальным точкам полиномом вида:

$$W(P) = C_3 \cdot P^3 + C_2 \cdot P^2 + C_1 \cdot P + C_0, \quad (6.6)$$

разбив область изменения  $P$  на 2 участка,  $P > -2$  кПа и  $P < -2$  кПа, на которых коэффициенты  $C_i$  полинома имели следующие значения:

$$\text{при } P > -2000 \text{ Па: } C_0 = 87,7; C_1 = 1,155 \cdot e^{-3}; C_2 = -1,014 \cdot e^{-6}; C_3 = -6,49 \cdot e^{-9};$$

$$\text{при } P < -2000 \text{ Па: } C_0 = 168; C_1 = -9,95 \cdot e^{-2}; C_2 = 1,63 \cdot e^{-5}; C_3 = 0.$$

Для оценки чувствительности метода определения основной гидрофизической характеристики к использованной толщине слоя почвозаменителя и проверки полученной зависимости  $W(P)$  была вычислена относительная максимальная погрешность аппроксимации, вносимая нелинейностью основной гидрофизической характеристики в диапазоне  $\pm 0,3$  кПа, соответствующем изменению гравитационной составляющей водного потенциала по высоте корневого модуля диаметром 60 мм. Величину относительной погрешности вычисляли в рабочем диапазоне водных потенциалов по формуле:

$$(M_0(P) - M_T(P))/M_0(P), \quad (6.7)$$

где  $M_0(P)$  и  $M_T(P)$  – расчетные величины влагосодержания в корневом модуле в невесомости и при действии силы тяжести соответственно;  $P$  – разрежение в корневом модуле в невесомости или на уровне оси при действии силы тяжести.

При вычислениях считали, что

$$M_0(P) = \pi \cdot R^2 \cdot L \cdot W(P), \quad (6.8)$$

$$M_T(P) = L \cdot \int_{-R}^R W(P + \rho gh) \cdot (\sqrt{R^2 - h^2}) \cdot dh, \quad (6.9)$$

где  $R$  – радиус цилиндрического корневого модуля,  $L$  – длина корневого модуля,  $h$  – координата по высоте корневого модуля,  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $W(P)$  – эмпирически найденная зависимость (6.6).

Рассчитанная по уравнению (6.7) погрешность объемной влажности почвозаменителя в корневом модуле при различных значениях водного потенциала,  $P$ , не превышала 5 %, что свидетельствует о корректности использованной методики определения основной гидрофизической характеристики  $W(P)$ .

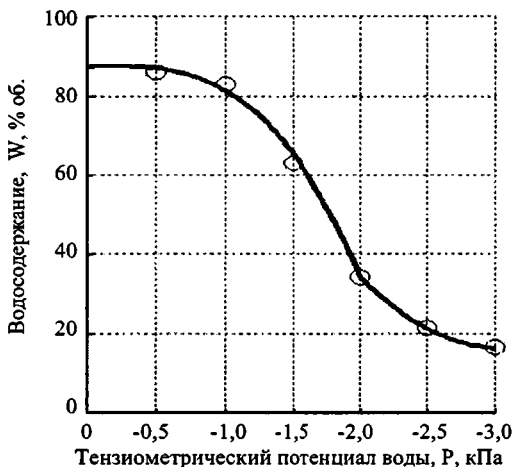


Рис. 6.10. Основная гидрофизическая характеристика почвозаменителя «БИОНА-В3»

Для получения более точной регрессионной зависимости коэффициента влагопроводности ненасыщенного влагой почвозаменителя,  $K$ , от величины водного потенциала,  $P$ , в необходимом для расчетов диапазоне водных потенциалов использовали экспериментально полученные точки коэффициента влагопроводности ненасыщенного влагой почвозаменителя, дополненные точкой влагопроводности при его насыщении, соответствующей коэффициенту фильтрации,  $K_{\phi}$ . Коэффициент  $K$  экспериментально определяли в нестационарном режиме с помощью капилляриметра в диапазоне значений водных потенциалов от -3,5 до -2,0 кПа (Судницын и Сидорова, 1994). Коэффициент влагопроводности ненасыщенного влагой почвозаменителя рассчитывали по формуле:

$$K = V \cdot Q / (V \cdot \Delta P \cdot a^2), \quad (6.10)$$

где  $Q$  – суммарный выход воды при данном уровне разрежения,  $\text{см}^3$ ;  $V$  – объем образца,  $\text{см}^3$ ;  $\Delta P$  – разность разрежений,  $\text{см вод. ст.}$ ;  $a$  – коэффициент, зависящий от сопротивления, размеров фильтра и образца,  $\text{см}^2$ ;  $B$  – коэффициент, определяемый графически по экспериментальной зависимости  $\ln(Q - Q_1)$  от  $t$ , где  $Q_1$  – выход воды за время  $t$ .

Измерения коэффициента фильтрации,  $K_\Phi$ , проводили на фильтре № при напоре воды, равном 4 мм (Воронин, 1986). Расчет вели по формуле:

$$K_\Phi = Q \cdot L / (S \cdot t \cdot P_n), \quad (6.11)$$

где  $Q$  – количество отфильтровавшейся воды,  $\text{см}^3$ ;  $S$  – площадь образца почвозаменителя,  $\text{см}^2$ ;  $t$  – время фильтрации,  $\text{с}$ ;  $P_n$  – напор воды в  $\text{см вод. ст.}$ ;  $L$  – высота образца,  $\text{см}$ .

Экспериментально полученные значения  $K$  и  $K_\Phi$  аппроксимировали следующей регрессионной зависимостью  $K(P)$ :

$$K(P) = k \cdot \exp(P/p) [\text{см}^3/\text{с/г}]; \quad (6.12)$$

при $P > -1,8$ кПа:	$k = 1,5 \cdot e^{-6}$ ;	$p = 2,0$ ;
при $P < -1,8$ кПа:	$k = 1,08 \cdot e^{-4}$ ;	$p = 0,364$ .

Таким образом, были идентифицированы два недостающих параметра общего уравнения влагопереноса (3.51), позволяющих перейти к определению длительности переходных процессов и распределения водных потенциалов по объему корневого модуля.

Для проверки адекватности расчетного выбора размеров корневого модуля необходимо было построить модель изменения водосодержания в корневом модуле в режиме откачки. Этот же режим был использован для проверки адекватности расчетной модели с экспериментальными данными. При разработке модели считали, что перераспределение воды в почвозаменителе происходит в течение некоторого времени от исходного равновесного до конечного равновесного состояний. Причинами перераспределения воды могут быть изменения величины водного потенциала на границе слоя почвозаменителя, интенсивности света или ориентации корневого модуля относительно вектора силы тяжести. Решения, описывающие такие переходные процессы, называют нестационарными. Для нахождения решений уравнения (3.51) применительно к нашим конструкциям корневых модулей были заданы граничные условия на двух поверхностях слоя почвозаменителя:

1) на внутренней поверхности плоского слоя или рулона почвозаменителя, прилегающей к пористой мембране (трубке), граничное значение водного потенциала,  $P_{гг}$ , определяется выражением, учитывающим конечную влагопроводность мембраны (трубки):

$$P_{гр} = P_v - j / K_m, \quad (6.13)$$

где  $P_v$  – величина разрежения в воде под мембраной,  $K_m$  – гидравлическая проводимость мембраны,  $j$  – плотность потока воды через мембрану в данном месте.

2) поток воды через внешнюю поверхность корнеобитаемой среды в корневом модуле, закрытом снаружи защитным чехлом, равен нулю, что соответствует граничному условию для полного водного потенциала:

$$(\text{grad}P_{\Pi} \cdot \bar{n}) = 0, \quad (6.14)$$

где  $\bar{n}$  – вектор нормали к граничной поверхности.

Уравнение (3.51) решали численно методом конечных разностей с использованием пакета программ MATLAB версии 6.5. В частности, при построении программы использовали следующие алгоритмы/приемы. Для пространственных координат  $r$ ,  $\phi$  и времени  $t$  были выбраны дискретные сетки  $r_i = r_1 + (i-1) \times \Delta r$ ;  $\phi_j = \phi_1 + (j-1) \times \Delta \phi$ ;  $t_k = t_0 + k \times \Delta t$ ;  $i = 1, 2, \dots, N_i$ ;  $j = 1, 2, \dots, N_j$ ;  $k = 1, 2, \dots, N_k$ , в узлах которых вычисляли значения величин, входящих в (3.51). Производные первого и второго порядков по пространственным координатам аппроксимировали разностными отношениями  $dP/dx(x_i) = (P(x_{i+1}) - P(x_{i-1})) / (2 \times \Delta x)$  и  $d^2P/dx^2(x_i) = (P(x_{i+1}) + P(x_{i-1}) - 2 \times P(x_i)) / (\Delta x)^2$  соответственно. Производную по времени аппроксимировали, как  $dP/dt(t_k) = (P(t_{k+1}) - P(t_k)) / \Delta t$ . Такое приближение для производной по времени значительно упрощает вычислительную процедуру, т.к. позволяет по известному в данный момент времени решению непосредственно вычислять решение в следующий момент времени. Решение начинали с заданного в начальный момент распределения  $P(r, \phi, t_0)$ . Используя приведенные разностные аппроксимации в уравнении (3.51), рассчитывали значения функции  $P(r, \phi, t_k)$  на следующем шаге  $k$  по времени во всех внутренних точках области. После этого, используя граничные условия (6.13) и (6.14), рассчитывали значения функции  $P$  в граничных точках области расчета, чем и завершался шаг вычислительной процедуры по времени. Величина шага по времени, обеспечивающая устойчивость решения, была определена эмпирически и составляла  $(1 - 5) \times 10^{-3}$  с, шаг по координате  $r$  выбирался в диапазоне от 0,3 мм до 1,0 мм.

Гидравлическая проводимость пористой трубки из ППВФ на 1 см длины составила  $21,4 \pm 1,1 \text{ см}^2 / (\text{кПа} \cdot \text{мин})$ . Соответственно максимальный перепад давлений при переходных процессах стока через стенки трубки при максимальном потоке в 5—7 раз меньше соответствующих скачков давления в начале переходных процессов, что позволило пренебречь влиянием гидравлического сопротивления трубки из ППВФ при расчете переходных процессов в корневом модуле.

Полученные численным методом решения уравнения (3.51) позволили получить модели изменения водосодержания в корневом модуле и распределения водного потенциала в сечении корневого модуля в течение переходных процессов в фазах II и III (пауза и откачка воды).

### 6.3.3. Расчет параметров блока корневых модулей цилиндрической оранжереи

Блок корневых модулей для цилиндрической конвейерной оранжереи состоит из отдельных съемных модулей, поэтому их размеры взаимосвязаны (рис. 6.6). Характерные размеры корневых модулей следует рассчитывать исходя из требуемой производительности оранжереи, периодичности получения урожаев в ней и с учетом существующих ограничений для размеров блока корневых модулей (Беркович, 2000). Важным параметром конструкции корневого модуля является диаметр пористой трубки, который может как влиять на значение наружного диаметра корневого модуля, так и зависеть от него.

При расчете наружного диаметра корневого модуля,  $D_{\text{км}}$ , и диаметра пористой трубки,  $D_{\text{т}}$ , прежде всего были определены минимально допустимые масса,  $M_{\text{п}}$ , и объем,  $V_{\text{п}}$ , почвозаменителя, которые могут обеспечить заданную продуктивность в оранжерее. Эти параметры могут быть выражены через количество растений в посеве,  $n$ , минимально допустимый объем выбранного почвозаменителя для одного растения,  $V_{\text{уд}}$ , и объемную плотность почвозаменителя,  $\gamma$ :

$$V_{\text{п}} = n \cdot V_{\text{уд}}; M_{\text{п}} = V_{\text{п}} M_{\text{у}}. \quad (6.15)$$

Далее была определена средняя сырая масса,  $M_{\text{п}}$ , одного растения выбранной культуры (пекинская капуста, сорт Хибинская) в фазе товарной спелости для цилиндрического корневого модуля, заполненного почвозаменителем «БИОНА-В3», при культивировании растений в оранжерее «Фитоконвейер». Поскольку запланированная производительность «Фитоконвейера»,  $p$ , принята равной 40 г съедобной биомассы в сутки, а количество шагов растительного конвейера, равное числу корневых модулей, равно 6, то при 30-дневной вегетации длительность шага растительного конвейера составит 5 дней. Согласно результатам опытов по выращиванию растений в оранжерее «Фитоцикл СД», средний вес сырой массы одного растения в фазе товарной спелости,  $m_{\text{р}}$ , равен 34 г при средней доле съедобной биомассы в общей массе побегов,  $K_{\text{хоз}}$ , равной 0,85. Учитывая, что объем выбранного почвозаменителя для одного растения,  $V_{\text{уд}}$ , должен составить около 120 см<sup>3</sup>/растение, а объемная плотность воздушно-сухого почвозаменителя «БИОНА-В3»,  $\gamma$ , составляет 0,15 г/см<sup>3</sup> (Berkovich, Krivobok et al., 2003), количество растений в корневом модуле можно определить из выражения:

$$n = p M_{\text{тц}} / (K_{\text{хоз}} M_{\text{мр}}) = 40 M_5 / (0,85 M_{39,2}) = 6. \quad (6.16)$$

Подставляя найденное значение  $n$  и указанные выше значения величин  $V_{уд}$  и  $\gamma$  в формулу (6.15), получаем:

$$V_{п} = 6 \cdot 120 = 720 \text{ (см}^3\text{)}; \quad M_{п} = 720 \cdot 0,15 = 108 \text{ (г)}. \quad (6.17)$$

Таким образом, объем почвозаменителя в корневом модуле должен составить 720 см<sup>3</sup>, что соответствует массе, равной 108 г.

На следующем этапе определили максимально допустимое значение радиуса окружности,  $R$ , описанной вокруг блока корневых модулей, который является радиусом посадочной квазицилиндрической поверхности для конвейерного посева в оранжерее. Величина  $R$  имеет ограничение сверху, поскольку разница между радиусом цилиндрического светильника оранжереи на последнем шаге растительного конвейера,  $R_{max}$ , и радиусом блока корневых модулей не может быть меньше максимальной высоты посева на последнем шаге конвейера,  $H_{max}$ :

$$R \leq (R_{max} - H_{max}) \quad (6.18)$$

Для посева пекинской капусты в оранжерее «Фитоконвейер»  $R_{max}$  составил 37,5 см, а максимальная высота посева в момент уборки урожая – 27 см. Подставив эти значения в выражение (6.18), получим  $R \leq 10,5$  см, т. е. диаметр блока корневых модулей,  $D_{БКМ}$ , не должен превышать 21 см.

При компоновке блока из  $N$  цилиндрических корневых модулей существует геометрическое соотношение между диаметрами корневого модуля и всего блока:

$$D_{БКМ} \geq D_{КМ} (1 + 1/\sin(\rho/N)) \quad (6.19)$$

При  $N = 6$  выражение (6.19) приводит к неравенству:

$$D_{БКМ} \geq 3D_{КМ} \quad (6.20)$$

При диаметре блока корневых модулей, равном 21 см, получим ограничение для наружного диаметра корневого модуля в «Фитоконвейере»:

$$D_{КМ} \leq 7 \text{ см}. \quad (6.21)$$

Диаметр пористой трубки в корневом модуле вычисляли, исходя из необходимого объема почвозаменителя в корневом модуле, равного 720 см<sup>3</sup>. Длина корневого модуля и запорной пористой трубки в нем,  $L$ , составила 25 см исходя из габаритных ограничений, установленных для «Фитоконвейера».

Диаметр пористой трубки,  $D_T$ , практически равен внутреннему диаметру цилиндрического слоя почвозаменителя, определяемого по формуле:

$$D_T = \sqrt{D_{КМ}^2 - \frac{4 V_{п}}{\pi L}}. \quad (6.22)$$

Подставив в формулу (6.22) максимальный диаметр корневого модуля,  $D_{\text{км}}$ , равный 7 см, объем почвозаменителя,  $V_{\text{п}}$ , равный  $720 \text{ см}^3$  и длину  $L$  корневого модуля, равную 25 см, получим, что диаметр пористой трубки,  $D_{\text{т}}$ , равен 3,5 см.

Наконец, для подтверждения правильности расчета максимальных размеров диаметров корневого модуля и пористой трубки для системы корневого снабжения с периодической реверсивной водоподачей была проведена экспериментальная оценка длительности переходного процесса на фазе откачки воды из корневого модуля; полученные данные были затем сопоставлены с длительностями других фаз циклограммы для блока корневых модулей.

В опытах с растениями листовой горчицы было показано, что суммарный нетто-фотосинтез самораздвигающегося посева на цилиндрической поверхности при фиксированной густоте посадки монотонно увеличивается по мере уменьшения радиуса посадочной поверхности (Беркович, 2000). Однако при диаметрах цилиндрических посадочных поверхностей порядка 10 – 20 см уменьшение диаметра в 1,5–2 раза дает прибавку фотосинтеза не более 10%. Уменьшить диаметр корневого модуля и, соответственно, всего блока корневых модулей в разрабатываемой оранжерее возможно лишь за счет уменьшения диаметра внутренней пористой трубки, но этот параметр имеет свои ограничения по влагопроводности и не может быть существенно изменен. Вследствие этого возможность дальнейшего уменьшения диаметра блока корневых модулей ради увеличения кпд фотосинтеза растений в оранжерее не рассматривали, как не рассматривали и возможность уменьшения диаметра блока корневых модулей за счет уменьшения объема почвозаменителя в корневом модуле при одновременном добавлении в почвозаменитель медленно действующих удобрений для компенсации уменьшения количества минеральных элементов в корневом модуле.

### **6.3.4. Расчет параметров циклограммы работы системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей**

#### **6.3.4.1. Определение объема и длительности закачки воды в корневые модули**

При определении оптимальных времени и объема воды, закачиваемой в корневой модуль в фазе I циклограммы работы системы корневого снабжения, необходимо иметь в виду, что, во-первых, в капиллярно-пористой среде количество заземленных потоком пор может существенно меняться в зависимости от скорости закачивания воды, и, во-вторых, корневая система растений может заметно повлиять на физико-химические свойства корнеобитаемой среды вследствие проникновения корешков в поры почвозаменителя,

выделения в среду продуктов метаболизма и накопления отмирающих корней, а также седиментации минеральных компонентов (Зубкова и Карпачевский, 2001; Пинский, 1997).

Влияние корневой системы на характеристики волокнистого ионообменного почвозаменителя исследовали, определяя гидрофизические свойства почвозаменителя до и после выращивания на нем в течение 30 сут растений пекинской капусты. Параметры закачки воды определяли на цилиндрических корневых модулях длиной 58 см, установленных на испытательном стенде (рис. 6.2). Объем почвозаменителя «БИОНА-ВЗ» составил 1580 см<sup>3</sup>/модуль. Перед началом измерений корневые модули погружали в ванну с водой на 2–3 ч для насыщения их водой, а затем устанавливали на стенде и сливали воду до стационарного состояния при разрежении в сливной магистрали -3,0 кПа. Далее в корневые модули с помощью насоса-дозатора закачивали воду с расходом воды в диапазоне от 0,17 до 4,5 мл/с до появления капель воды на нижней кромке вкладыша, каждый раз фиксируя дозу закаченной в корневой модуль воды. Этот объем воды считали максимально допустимым для выбранного режима закачки в наземных условиях. Проведенные эксперименты уже на предварительном этапе полностью подтвердили предположение о зависимости максимально допустимого объема закачки воды в корневой модуль от средней скорости расхода подаваемой воды. Эти опыты также подтвердили сделанные предположения о изменении характеристик почвозаменителя по мере развития в нем корневой системы, о чем свидетельствует изменение объемов воды, закачиваемой в корневой модуль с одним и тем же расходом до и после вегетации (рис. 6.11).

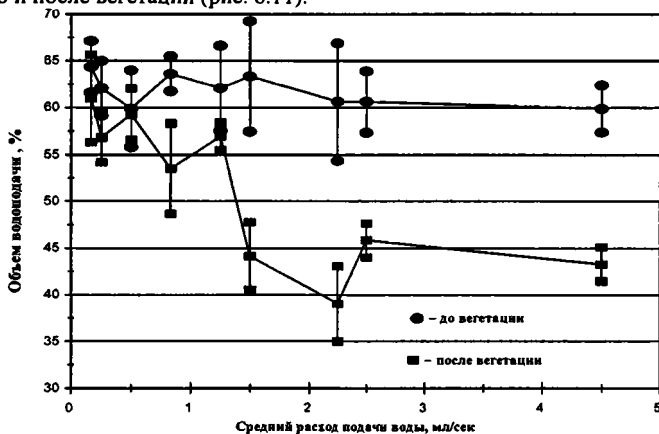


Рис. 6.11. Допустимый объем закачиваемой в корневой модуль воды в процентах от гравитационной влагоемкости в зависимости от среднего расхода водоотдачи. В каждой точке указан доверительный интервал на уровне значимости 0,05



Выявленные эффекты в какой-то мере могли быть обусловлены импульсным характером подачи воды в почвозаменитель, так как средний расход воды в каждом случае зависел от величины как отдельной дозы воды,  $v_d$ , подаваемой насосом-дозатором, так и паузы между ними. Для учета влияния каждого из этих факторов были проведены дополнительные исследования при фиксированном значении времени подачи одной дозы,  $t_d$ , в используемых насосах-дозаторах, равном 4 с. Диапазон варьирования дозы воды,  $v_d$ , составил от 2 до 18 мл, а длительности паузы,  $\tau$  – от 0 до 8 с. При данных условиях зависимость расхода водоподачи,  $Q$ , от объема дозы,  $v_d$ , и длительности паузы между ними,  $\tau$ , имела вид:

$$Q = v_d / (t_d + \tau) = v_d / (4 + \tau). \quad (6.23)$$

С целью изучения влияния параметров  $v_d$  и  $\tau$  на максимально возможный объем заправки воды,  $V_{d \text{ макс}}$ , был проведен полный факторный эксперимент по плану  $3^2$  для свежего и использованного почвозаменителя. Для составления плана использовали следующие обозначения и кодирование переменных:

$$Y = V_{d \text{ макс}}; \quad x_1 = v_d; \quad x_2 = \tau.$$

$$x_1 = 0 \text{ при } \tilde{x}_1 = \tilde{x}_1^0 = 10 \text{ мл}; \quad x_2 = 0 \text{ при } \tilde{x}_2 = \tilde{x}_2^0 = 4 \text{ сек};$$

$$x_1 = -1 \text{ при } \tilde{x}_1 = 2 \text{ мл}; \quad x_2 = -1 \text{ при } \tilde{x}_2 = 0 \text{ сек};$$

$$x_1 = 1 \text{ при } \tilde{x}_1 = 18 \text{ мл}; \quad x_2 = 1 \text{ при } \tilde{x}_2 = 8 \text{ сек}.$$

В общем случае можно записать:

$$x_1 = (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_1^0) / 8; \quad x_2 = (\tilde{x}_2 - \tilde{x}_2^0) / 4. \quad (6.24)$$

План эксперимента в кодированных переменных и экспериментально полученные значения  $Y_i$ , в трех повторностях каждое, приведены в табл. 6.3.

В табл. 6.4 представлены величины статистически значимых коэффициентов в полученных регрессионных моделях для свежего и использованного почвозаменителей, а в табл. 6.5 – основные статистические оценки полученных регрессионных уравнений. Дисперсию воспроизводимости измерений, приведенную в табл. 6.5, определяли как среднюю от дисперсий в опытах 1 – 9 приведенной матрицы для  $Y$ , которые для обоих состояний почвозаменителя оказались однородными по критерию Кохрена при 5 % уровне значимости.

Таблица 6.3

План двухфакторного эксперимента  $3^2$  и опытные значения максимально допустимой дозы залива  $Y$  для двух состояний почвозаменителя

№ опыта	План эксперимента		Полученные значения максимальной дозы $Y$ , мл							
	$x_1$	$x_2$	до вегетации				после вегетации			
			$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_{cp}$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_{cp}$
1	-1	-1	1130	1140	1020	1096	970	910	900	926
2	0	-1	1150	1050	1130	1110	720	690	740	716
3	1	-1	1140	1090	1060	1096	680	700		676
4	-1	0	1190	1120	1100	1136	870	865	930	888
5	0	0	1110	1080	1220	1136	910	870	890	890
6	1	0	1130	1000	1200	1110	560	600	670	610
7	-1	1	1150	1155	1230	1178	980	1000	880	953
8	0	1	1200	1150	1145	1165	870	760	880	836
9	1	1	1100	1110	1270	1160	740	640	690	690

Таблица 6.4

Значимые коэффициенты в регрессионных моделях

Состояние почвозаменителя	Обозначение переменной	Обозначение коэффициента	Значение коэффициента
До вегетации	-	$B_0$	1132
	$x_2$	$B_3$	33
После вегетации	-	$B_0$	877
	$x_1$	$B_1$	-132
	$x_2$	$B_3$	60
	$x_1^2 \cdot x_2$	$B_5$	-50
	$x_1^2 \cdot x_2^2$	$B_8$	176

Таблица 6.5

## Статистические оценки регрессионных моделей

Состояние почвозаменителя	Дисперсия воспроизводимости	Дисперсия адекватности	Критич. зн. распределения Фишера, $F_{кр}(0,05; 7; 2)$
До вегетации	720	10,8	
После вегетации	344	16,8	2,58

На рис. 6.12 представлены двумерные зависимости допустимого объема закачиваемой в корневой модуль воды,  $V_{дмакс}$ , от величины дозы,  $v_d$ , и паузы,  $\tau$ , между дозами для состояний почвозаменителя до вегетации растений (поверхность А) и после 30-дневной вегетации (поверхность Б).

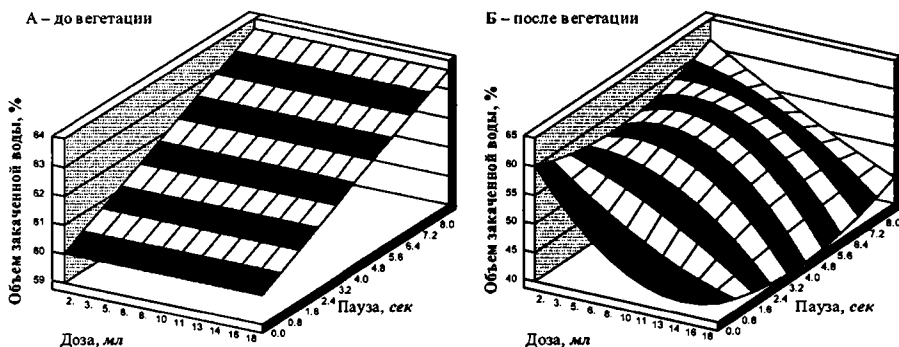


Рис. 6.12. Зависимости максимально допустимого объема воды, закачиваемой в корневой модуль до и после вегетации, от величин доз и пауз между дозами, процент от полной гравитационной влагоемкости

Поверхность А является плоскостью, пересекающей с плоскостью  $V_{дмакс} = 0$  по прямой, параллельной оси, на которой отложены значения доз воды. Это означает, что величина дозы воды, подаваемой насосом в свежий почвозаменитель, практически не влияет на  $V_{дмакс}$  в исследованной области значений аргументов, а допустимый объем закачки связан линейной зависимостью лишь с паузой между дозами. Приведенные данные показывают, что для свежего почвозаменителя изменение  $V_{дмакс}$  во всем исследованном диапазоне не превышает 5% от полной гравитационной влагоемкости почвозаменителя.

После 30-дневной вегетации характеристики почвозаменителя изменились. Характер зависимости  $V_{d\max}$  от  $V_d$  и  $\tau$  стал нелинейным, о чем свидетельствуют значимые коэффициенты регрессионного уравнения в табл. 6.4. На большей части области определения эти зависимости немонокотны, а их двумерные сечения имеют локальные экстремумы. Диапазон зон варьирования предельно допустимых доз закачки в использованный почвозаменитель существенно шире по сравнению со свежим и достигает 20 % от полной гравитационной влагоемкости. Причиной выявленного снижения  $V_{d\max}$  в процессе выращивания растений является, очевидно, изменение гидрофизических свойств почвозаменителя, предположительно уменьшение краевого угла смачивания поверхности волокон почвозаменителя и образование зон различной плотности в почвозаменителе корневого модуля вследствие формирования мощного мата из корней, а также неоднородности самого корневого мата. Можно предположить, что при подаче очередной дозы воды в использованный почвозаменитель вода поступает через пористую трубку во внутренний слой субстрата не равномерным по толщине слоем, как в свежий почвозаменитель, а как бы «лепестками» различных размеров в направлениях с наименьшим гидравлическим сопротивлением, что приводит к увеличению доли заземленных пор. Помимо нарушения однородности почвозаменителя в объеме корневого модуля, локальные изменения гидравлического сопротивления могут быть вызваны также местными засорениями капилляров пористой трубки нерастворимыми частицами, частичным забиванием капилляров корневыми волосками или образованием на поверхности трубки плотного слоя корней. Выявленные изменения гидрофизических свойств почвозаменителя были затем подтверждены в опытах по определению времени переходных процессов при откачке воды из корневого модуля.

Полученные экспериментальные данные позволяют обосновать ограничения для величины закачиваемого в корневой модуль объема воды при работе системы корневого снабжения в условиях действия силы тяжести, а также оценить длительность фазы закачки воды. Поскольку гравитационная влагоемкость в цилиндрических корневых модулях предложенной конструкции практически совпадает с максимальной влагоемкостью,  $W_{\max}$ , определяемой как произведение порозности,  $\varepsilon$ , на объем почвозаменителя,  $V_{\Pi}$ , то можно заключить, что при наиболее интенсивном режиме водоподдачи в корневой модуль объем закачиваемой дозы,  $V_d$ , следует ограничивать величинами порядка  $0,63 \cdot \varepsilon \cdot V_{\Pi}$  и  $0,4 \cdot \varepsilon \cdot V_{\Pi}$  для свежего и использованного почвозаменителей соответственно. Для обеспечения надежной работы системы корневого снабжения без перенастройки режима водоподдачи за основу расчетов следует брать меньшую из доз, то есть  $0,4 \cdot \varepsilon \cdot V_{\Pi}$ . Конкретно для почвозаменителя «БИОНА-ВЗ» следует воспользоваться его ОГХ из (6.6), с тем, чтобы сделать поправку

величины дозы, учитывающую водосодержание в КМ, соответствующее нижней границе оптимального диапазона ВП, равного  $-2,5$  кПа. С учетом этой поправки можно посчитать, что при таком нижнем уровне ВП поданная доза воды в КМ должна уменьшиться на 5 % и составить  $0,35 \cdot \varepsilon \cdot V_{\text{П}}$ . Учитывая, что для почвозаменителя «БИОНА-ВЗ»  $\varepsilon = 0,85$ , окончательно можно написать выражение для расчета  $V_{\text{д}}$  в данном случае:

$$V_{\text{д}} = 0,3 \cdot V_{\text{П}} \quad (6.25)$$

Нижний уровень содержания воды в почвозаменителе,  $V_0$ , по зависимости (6.6), соответствующий уровню водного потенциала  $-2,5$  кПа, определяется выражением:

$$V_0 = 0,17 \cdot V_{\text{П}} \quad (6.26)$$

Отсюда максимально возможное водосодержание в КМ, достигаемое после закачки дозы в конце фазы I, равно:

$$V_{\text{МАХ}} = 0,47 \cdot V_{\text{П}} \quad (6.27)$$

Максимально возможному содержанию воды в почвозаменителе корневого модуля соответствует, согласно уравнению (6.6), значение водного потенциала около  $-1,7$  кПа на уровне оси корневого модуля.

Расчеты объемов по выражениям (6.25), (6.26) и (6.27) были проведены с учетом самого низкого из экспериментально полученных значений содержания воды в почвозаменителе корневого модуля при высоких расходах водоподачи. Такой уровень был достигнут при средней скорости водоподачи  $1,5$  мл/с и при дальнейшем ее увеличении практически не менялся в пределах ошибки эксперимента (рис. 6.11). Выражения (6.25), (6.26) и (6.27) дают основание заключить, что для обеспечения заданных параметров фазы закачки в циклограмме работы системы корневого снабжения возможно, при работе насосов-дозаторов поршневого типа, использование наиболее интенсивного режима без паузы между качками с величиной расхода  $Q_{\text{МАХ}} = v_{\text{д}}/t_{\text{д}}$ , согласно (6.23). С учетом уравнения (6.25), минимальное время закачки воды в корневой модуль в фазе I, равно  $V_{\text{д}}/Q_{\text{МАХ}}$ , можно определить по выражению:

$$T_1 = 0,3 \cdot V_{\text{П}} \cdot t_{\text{д}} / v_{\text{д}} \quad (6.28)$$

Подставляя в выражения (6.25) – (6.28) рассчитанные ранее объем почвозаменителя, равный  $720 \text{ см}^3$ , время длительности подачи одной порции воды насосом-дозатором, равное  $4$  с, и объем одной дозы насоса-дозатора, равный  $20 \text{ см}^3$ , можно определить режимные параметры системы корневого снабжения для оранжерей «Фитоконвейер»:

$$\begin{cases} V_D = 216 \text{ см}^3; \\ V_0 = 122 \text{ см}^3; \\ V_{MAX} = 338 \text{ см}^3; \\ T_I \geq 43 \text{ с} \approx 1 \text{ мин} \end{cases} \quad (6.29)$$

В заключение следует отметить, что уменьшение расхода закачки воды в почвозаменитель в десять раз – до 0,15 мл/с – позволяет увеличить объем закачанной дозы всего в полтора раза (рис. 6.11), поэтому нецелесообразно приближать максимальное значение водного потенциала в корневом модуле к верхней границе диапазона допустимых значений. В противном случае длительность фазы закачки воды в корневой модуль может существенно увеличить суммарную длительность цикла работы системы корневого снабжения в каждом корневом модуле, что затруднит выполнение условия (6.5) при организации цикла поочередного обслуживания всех шагов растительного конвейера в оранжерее.

#### 6.3.4.2. Определение длительности паузы между закачкой и откачкой воды в корневых модулях

Определение длительности фазы II (паузы),  $T_{II}$ , в циклограмме работы системы корневого снабжения является одним из ключевых моментов в организации водообеспечения растений. Согласно полученному в п. 2.2 выражению (6.3) для расчета длительности фаз  $T_I$  и  $T_{II}$  максимально допустимая длительность паузы,  $T_{II \text{ max}}$ , определяется из (6.3) при условии равенства нулю объема сливаемой в цикле воды. Подставив в (6.3)  $V_{сл} = 0$ , получим:

$$T_{II \text{ max}} = V_D / v - T_I \quad (6.30)$$

Для расчета максимально допустимой длительности фазы II необходимо знать максимальное потребление воды растениями, которое зависит от видовых особенностей культуры. Например, при выращивании пекинской капусты в течение 30 сут в оранжерее «Фитоцикл СД», в которой условия освещения и культивирования были близкими к таковым в разрабатываемой оранжерее «Фитоконвейер» (освещение красными и синими светодиодами с суммарной плотностью потока фотонов около 350 мкмоль/м<sup>2</sup>·с), средняя величина плотности стоков,  $J$ , в корневых модулях составила около 1,0·10<sup>-3</sup> мл/мин·см<sup>3</sup> (Douger, Bugbee, 1998). Для сравнения отметим, что средняя величина плотности стоков в корневых модулях оранжереи «Фитоцикл» при освещении люминесцентными лампами белого света с плотностью потока фотонов около 115 мкмоль/м<sup>2</sup>·с была вдвое меньше, порядка 0,5·10<sup>-3</sup> мл/мин·см<sup>3</sup>. Учитывая, что объем почвозаменителя для корневого модуля

«Фитоконвейера» равен  $720 \text{ см}^3$ , максимальное водопотребление в единицу времени,  $v$ , составит:

$$v = J \cdot V_{II} = 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 720 = 0,72 \text{ [мл/мин]}. \quad (6.31)$$

Подставляя в выражение (6.30) для расчета длительности фазы II величины, найденные с учетом уравнений (6.25) и (6.29), получим:

$$T_{II \text{ МАХ}} = 0,3 \cdot V_{II} / J \cdot V_{II} - T_I - T_{III} = 0,3 / J - T_I = 0,3 / 1,0 \cdot 10^{-3} - 1 - 40 \approx 260 \text{ [мин]} \approx 4 \text{ [ч]}.$$

При снижении уровня освещения вдвое величина  $T_{II \text{ МАХ}}$ , соответственно, вдвое увеличится и составит около 8 ч.

Очевидно, что при условии поддержания постоянного водного потенциала на уровне оси цилиндрического корневого модуля (или внутри пористой трубки в невесомости) водный потенциал во внутренних слоях почвозаменителя снижается по мере возрастания интенсивности потребления воды посевом. Максимальное снижение происходит на внешней поверхности рулона почвозаменителя. Зависимости величины водного потенциала на внешней поверхности рулона почвозаменителя в корневом модуле при допущении равномерного распределения плотности стока (т. е. при условии  $J(r, z) = \text{const}$ ) в условиях невесомости, рассчитанные для двух уровней водного потенциала на внутренней поверхности:  $-0,5$  и  $-1,0$  кПа, приведены на рис. 6.13. При расчетах были учтены размеры корневых модулей оранжереи «Фитоконвейер». Представленные зависимости наглядно показывают, что при реальных значениях эвапотранспирации посевов зеленных культур средняя величина плотности стоков составляет примерно  $2 \cdot 10^{-5} \text{ мл/с} \cdot \text{см}^3$ , понижение водного потенциала вдоль радиусов цилиндрического корневого модуля не превышает 10 %, что позволяет пренебречь им при расчетах в первом приближении.

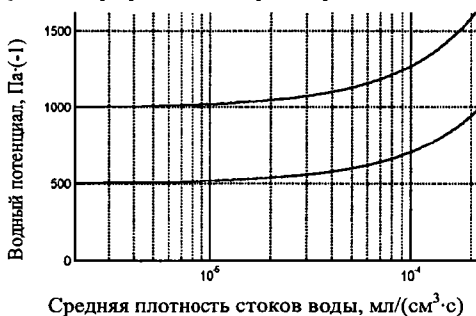


Рис. 6.13. Зависимость величины водного потенциала на внешней поверхности рулона почвозаменителя в КМ «Фитоконвейера» от величины средней по объему плотности стоков поглощаемой воды

### 6.3.4.3. Определение длительности откачки воды из корневых модулей

#### 6.3.4.3.1. Оценка длительности переходного процесса откачки из корневого модуля со свежезаправленным почвозаменителем

Эмпирические зависимости содержания воды в цилиндрическом корневом модуле от времени на стадии переходного процесса в фазе откачки воды представлены на рис. 6.14. Эти зависимости иллюстрируют динамику содержания воды в корневом модуле после скачкообразного уменьшения давления внутри пористой трубки от уровня  $-0,5$  кПа до значений  $-1,5$ ,  $-2,5$  и  $-3,0$  кПа с учетом действия силы тяжести; кроме того, рассчитана зависимость содержания воды в корневом модуле от времени при уменьшении водного потенциала внутри пористой трубки от  $-0,5$  до  $-3,0$  кПа для условий невесомости. Проведенные расчеты, выполненные с помощью программы MATLAB6p5, базировались на граничных условиях, определяемых уравнениями (6.13) и (6.14).

Анализ полученных зависимостей показал, что переходные процессы откачки воды из корневого модуля при заданных падениях давления в пористой трубке удовлетворительно соответствуют расчетной модели, что косвенно указывает на адекватность экспериментально определенных показателей: основной гидрофизической характеристики почвозаменителя,  $W(P)$ , и коэффициента влагопроводности,  $K(P)$ . Отклонения расчётных значений содержания воды в корневом модуле от средних экспериментальных оценок не превышали доверительных интервалов средних, т. е.  $\pm 14\%$ , с уровнем значимости  $5\%$ , во всех точках переходных процессов. При заданных условиях различия между переходными процессами осушения почвозаменителя для наземных условий и невесомости были пренебрежимо малы (рис. 6.14). Длительности переходных процессов, т. е. промежутков времени от начала осушения почвозаменителя до момента, когда различия между точками в вычисляемой последовательности значений становились равны доверительному интервалу для оценки эмпирических средних (около  $0,1$  кПа), рассчитанные для условий невесомости и Земли, отличались всего на несколько процентов. Эти расчеты косвенно подтвердили сделанный ранее вывод о незначительном влиянии нелинейности основной гидрофизической характеристики почвозаменителя «БИОНА-ВЗ» на переходные процессы откачки. Существенное влияние на длительность переходных процессов оказала величина скачка разрежения. Согласно проведенным расчетам, длительность переходного процесса при падении давления от  $-0,5$  до  $-1,5$  кПа была более чем в 4 раза меньше, чем при падении давления от  $-0,5$  до  $-3,0$  кПа: 3,5 мин и 14,5 мин соответственно.



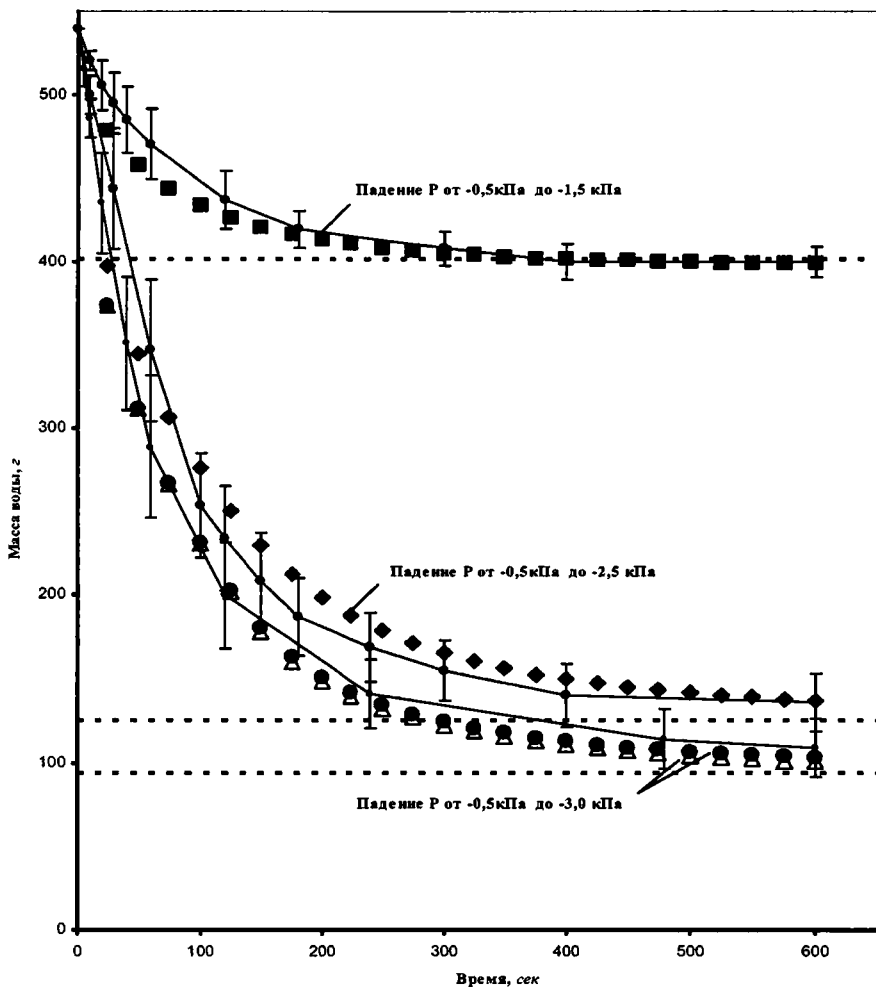


Рис. 6.14. Зависимости содержания воды в цилиндрическом корневом модуле от времени при переходных процессах в фазе откачки воды.

- , ◆, ● — расчеты с учетом силы тяжести после падения давления от  $-0,5$  до  $-1,5$ ;  $-2,5$  и  $-3,0$  кПа;
- ▲ — расчеты для условий невесомости после падения давления от  $-0,5$  до  $-3,0$  кПа;
- — асимптоты к расчетным зависимостям;
- I — средние экспериментальные данные с доверительным интервалом при значимости  $0,05$

Расчеты динамики содержания в воды в корневом модуле в режиме откачки воды на стадии переходного процесса были использованы в дальнейшем для построения зависимости длительности фазы откачки воды из корневого модуля – фаза III в циклограмме работы системы корневого снабжения – от величин внутреннего и внешнего диаметров валика из почвозаменителя в цилиндрическом корневом модуле. Эта зависимость была положена в основу расчета конструктивных параметров в корневом модуле для разрабатываемой оранжереи «Фитоконвейер».

В табл. 6.6 приведены расчётные значения длительности переходных процессов в фазе откачки воды из корневого модуля после падения давления в пористой трубке от -0,5 до -2,5 кПа при различных значениях внешнего диаметра корневого модуля и диаметра пористой трубки, равного диаметру внутренней поверхности почвозаменителя, а на рис. 6.16 представлен график зависимости длительности переходного процесса при осушении цилиндрического корневого модуля от толщины слоя почвозаменителя. Коэффициент корреляции между значениями, приведенными в таблице 6.6 и на рисунке 6.15, оказался равным 0,94, что подтвердило правомерность использования данной зависимости при экспресс-оценке длительности переходных процессов в фазе откачки воды из корневого модуля. Длительность переходного процесса в корневом модуле с пористой трубкой диаметром 25 мм и толщиной слоя почвозаменителя 2,5 мм составила около 9 с, а при уменьшении диаметра пористой трубки до 10 мм и увеличении толщины слоя почвозаменителя до 25 мм длительность переходного процесса приблизилась к получасу. При выбранных для «Фитоконвейера» диаметрах корневого модуля и пористой трубки, равных 70 и 35 мм соответственно, толщина слоя почвозаменителя составила 17,5 мм. Следовательно, длительность переходного процесса в корневом модуле «Фитоконвейера» должна составить около 10 мин. Однако специально проведенные исследования показали, что для более точного определения длительности фазы откачки необходимо еще ввести поправку на изменение гидрофизических свойств почвозаменителя по мере развития в нем корневой системы.

Таблица 6.6

Длительность переходных процессов в корневом модуле с почвозаменителем «БИОНА-В3» при падении разрежения в трубке с  $-0,5$  до  $-2,5$  кПа при различных диаметрах корневого модуля и пористой трубки

Диаметр корневого модуля, мм	Диаметр пористой трубки,	Длительность переходного процесса, мин
	мм	
30	10	3,2
	15	1,5
	25	0,14
40	10	8,0
	15	4,7
	25	1,4
50	10	15,4
	15	10,1
	25	4,2
60	10	25,8
	15	17,8
	25	8,8
70	20	20,8
	25	15,4
	30	10,8

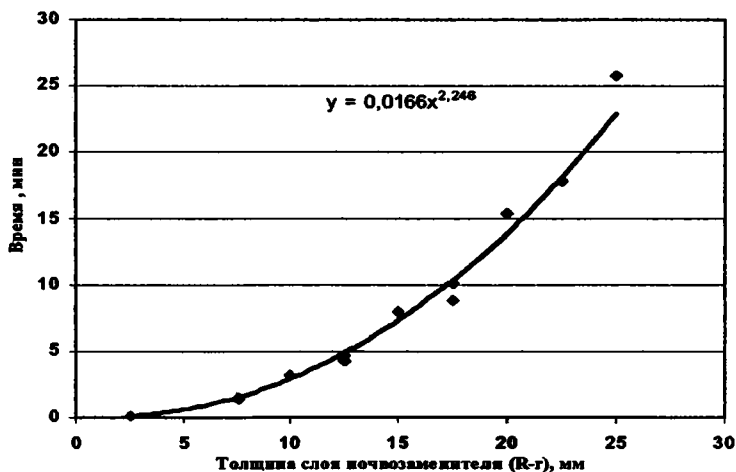


Рис. 6.15. Длительность переходного процесса в фазе откачки воды из цилиндрического корневого модуля после падения давления в пористой трубке от  $-0,5$  до  $-2,5$  кПа в зависимости от толщины слоя почвозаменителя «БИОНА-В3»

### 6.3.4.3.2. Коррекция процесса откачки воды из корневых модулей после вегетации растений

Выше уже было отмечено, что развитие корневой системы растений сопровождается изменениями физических и химических характеристик корнеобитаемой среды (Зубкова и Карпачевский, 2001; Пинский, 1997). Для уточнения динамики свойств почвозаменителя «БИОНА-ВЗ» под влиянием развивающейся корневой системы была проведена сравнительная оценка гидрофизических свойств образцов свежего почвозаменителя и почвозаменителя, на котором выращивали растения пекинской капусты в течение 60 и 90 сут. Образцы массой 1,6 г насыщали водой, помещали в капилляриметр, выдерживали при разрежении  $-1,5$  кПа в течение 1–2 ч, затем понижали водный потенциал до  $-2,0$  кПа и наблюдали изменение влагосодержания в почвозаменителе. Согласно полученным результатам, длительность переходного процесса в свежем почвозаменителе составила около 60 мин, а в почвозаменителе после выращивания на нем растений – от 250 до 300 мин (рис. 6.16). В то же время при одинаковых скачках давления из использованного почвозаменителя вытекало меньшее количество воды, чем из неиспользованного.

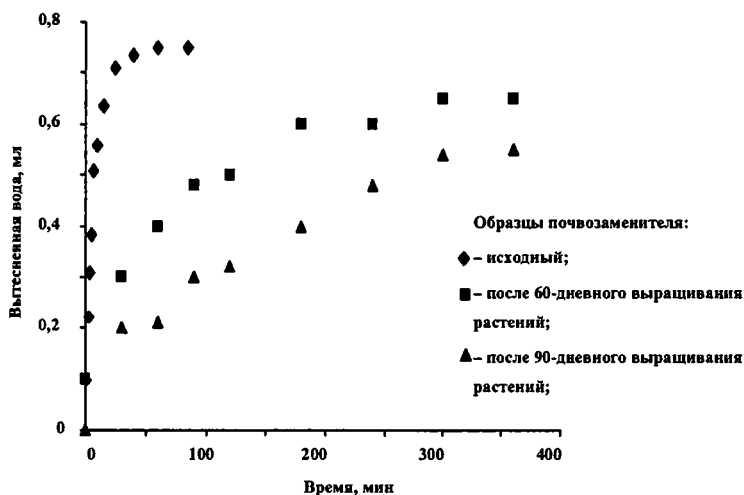


Рис. 6.16. Переходные процессы вытеснения воды из образцов почвозаменителя «БИОНА-ВЗ» в бюретку капилляриметра при падении давления от  $-1,5$  до  $-2,0$  кПа

Можно предположить, что эти изменения обусловлены увеличением гидрофильности поверхности волокон в процессе эксплуатации. Для выяснения реальных причин изменения гидрофизических свойств почвозаменителя необходимо проведение дополнительных исследований. Тем не менее полученные результаты неопровержимо свидетельствуют, что при определении таких параметров работы системы корневого снабжения, как доза закачиваемой в корневой модуль воды и длительность фазы откачки, необходимо учитывать планируемую длительность беспрерывного использования почвозаменителя. Для почвозаменителя «БИОНА-ВЗ» в корневом модуле «Фитоконвейера» в течение не более 60 сут достаточно увеличить длительность фазы откачки в циклограмме работы системы корневого снабжения в 4 раза по сравнению с длительностью переходного процесса откачки в свежем почвозаменителе. С учетом этой поправки длительность фазы откачки должна составить около 40 мин.

В завершение расчетов можно убедиться, что найденные длительности всех фаз удовлетворяют сформулированному выше критерию (6.5). Подстановка в него найденных значений в мин:  $T = 1$ ;  $T_{II} = 260$  и  $T_{III} = 40$  дает положительный результат. Таким образом, все параметры КМ и циклограммы рабочего режима СКС с периодической реверсивной водоподачей выбраны правильно.

#### **6.4. Наземные испытания системы корневого снабжения растений с реверсивной водоподачей в вегетационных опытах с зелеными культурами**

Предложенная система корневого снабжения с периодической реверсивной водоподачей была экспериментально проверена в наземных условиях в вегетационных опытах с листовыми культурами (Беркович, Смолянина и др., 2000; Berkovich, Tynes et al., 2002). Объектами опытов явились пекинская капуста, сорт Хибинская; китайская капуста, сортотип пак-чой и малая китайская капуста, сорт Токио Бекана (Токио Bekana). Для испытаний были использованы стенды – макеты системы реверсивной подачи, аналогичные описанным выше в п. 6.1.1 главы. В контрольных опытах те же растения выращивали при постоянных потенциалах в корнеобитаемой зоне на стендах, описанных выше в главе 3, п. 3.2.3.5.

Результаты проверки показали, что различия в продуктивности растений опытных и контрольного вариантов были статистически недостоверными при 5 % уровне значимости. Фенологические наблюдения за посевами на контрольном и испытательном стендах в течение 30-дневной вегетации не выявили каких-либо различий в развитии растений контрольного и опытных посевов.

В целом, по результатам апробации системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей в корневые модули, разработанной для выращивания растений в конвейерной оранжерее, можно сделать следующие заключения:

- разработанная для конвейерных космических оранжерей система корневого снабжения с периодической реверсивной водоподачей показала свою работоспособность в наземных условиях в ряде экспериментов с различными листовыми культурами. В частности, периодические изменения водного потенциала в корневых модулях с почвозаменителями «БИОНА-ВЗ» и Турфейс в диапазоне от  $-1,0 \pm 0,5$  кПа до  $-2,5 \pm 0,5$  кПа не влияли негативно на продуктивность растений, если пауза между фазами закачки и откачки воды в корневой модуль не превышала 6–8 ч;
- предложенные методы расчета позволили выбрать конструктивные параметры корневого модуля и параметры циклограммы рабочего режима системы корневого снабжения с реверсивной водоподачей, обеспечивающие адекватные условия в корнеобитаемой зоне растений в наземных условиях и, предположительно, в условиях невесомости, для работы как с одним корневым модулем, так и с блоком корневых модулей в конвейерных оранжереях;
- результаты расчета распределения водного потенциала в корневых модулях с капиллярно-пористым почвозаменителем, а также переходных процессов влагосодержания в режиме откачки воды из корневых модулей, полученные с помощью разработанных компьютерных программ, показали хорошее соответствие с экспериментально полученными в наземных опытах данными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из материалов, представленных в данной монографии, читатель может получить представление о современном состоянии разработок космических оранжерей. Мы постарались описать наиболее интересные, по нашему мнению, конструкции и методы культивирования, перспективные для применения на пилотируемых космических объектах в ближайшие годы.

Проработав много лет над созданием биорегенеративных систем жизнеобеспечения в Институте медико-биологических проблем под руководством известных специалистов в данной области д. м. н. Е. Я. Шепелева и д. б. н. Г. И. Мелешко, авторы хотели бы кратко высказать свое мнение о ближайших перспективах внедрения биологических компонентов в космические системы жизнеобеспечения.

Существующие системы жизнеобеспечения, основанные на запасах продуктов питания, взятых на борт перед полетом, и физико-химической регенерации воздуха и воды на борту в условиях космического полета успешно обеспечивали жизнедеятельность космонавтов на ОК «Мир», в том числе в полетах человека длительностью около полутора лет. Специалисты Ракетно-космической корпорации «Энергия» рассчитали, что такие системы с технической точки зрения вполне пригодны для жизнеобеспечения экипажа из шести человек в полете к Марсу и обратно. Масса такой системы жизнеобеспечения с запасами пищи, воды и оборудования составит менее 15 тонн, что вполне приемлемо для современных космических летательных аппаратов.

Однако для последующих, более длительных, космических экспедиций системы жизнеобеспечения данного типа бесперспективны. Организация жизнеобеспечения экипажа в межпланетных космических полетах принципиально невозможна без воспроизводства на борту продуктов питания, что, в свою очередь, потребует культивирования на борту сельскохозяйственных растений. Как писал в своей книге один из основоположников космической медицины В. И. Яздовский (1996), «... опыт развития человечества показал, что здоровый и деятельный образ жизни любого индивидуума связан с воспроизводством и употреблением растительной пищи, и иной альтернативы этому нет». Ключевой проблемой производства растительной продукции в условиях космического полета является создание специального оборудования для выращивания растений. Особо следует отметить, что 40-летние усилия по разработке биорегенеративной системы жизнеобеспечения с помощью микроорганизмов (водородных бактерий, микроводорослей) не увенчались успехом, несмотря на такие преимущества, как высокая удельная продуктивность на единицу потребляемых ресурсов, возможность быстрого восстановления популяции после аварийных ситуаций,

способность суспензий поглощать ряд поллютантов и другие (Sychev et al., 2003). Непреодолимым препятствием оказалась плохая усвояемость микроводорослей в пищевом тракте человека и животных. Например, потребление испытателями в пищу хлореллы или спирулины в количестве более 20–30 г в сутки приводило к диспепсическим и/или аллергическим реакциям, в то время как для регенерации кислорода, израсходованного за сутки на дыхание одним человеком, необходимо вырастить свыше 500 г сухой биомассы водорослей. Пользуясь аналогией с коэффициентом хозяйственного использования ( $K_x$ ) для сельскохозяйственных растений, можно рассчитать, что  $K_x$  при выращивании микроводорослей составляет не более 6 %, что во много раз меньше, чем у сельскохозяйственных растений пищевого назначения. Другими словами, при культивировании микроводорослей в качестве источника пищи отходы, которые затем необходимо будет перерабатывать или хранить, составят около 95 %.

Поскольку биомасса микроорганизмов в качестве пищи пока практически не нашла потребителей на борту пилотируемого космического аппарата, необходимо обосновывать целесообразность культивирования микроорганизмов в системах жизнеобеспечения с другими целями должна быть оценена путем сравнения с физико-химическими звеньями, осуществляющими аналогичные функции. Например, культиватор микроводорослей в роли генератора кислорода следует сравнить с бортовой системой регенерации кислорода при одинаковой производительности по кислороду, в частности, по предложенному критерию эквивалентной массы системы. Предварительные расчеты свидетельствуют пока не в пользу этого биологического компонента. Такой же подход должен быть применен при оценке эффективности микроводорослей для переработки урины или в качестве поглотителя газовых загрязнителей. На сегодняшний день, по нашему мнению, возможность включения культиватора микроводорослей в состав биорегенеративной системы жизнеобеспечения недостаточно обосновано, и для такого обоснования потребовались бы гораздо более детальных расчетов, чем те, которые сейчас приводятся в литературе сторонниками использования в СЖО именно этих фотоавтотрофов.

Как уже отмечалось, проведенные американскими и российскими исследователями расчеты приведенной массы СЖО, основанной на культивировании высших растений, сопоставленные с характеристиками запасов растительной пищи с поправками на снижение качества запасенной пищи при длительном хранении, выявили преимущества применения космических оранжерей при полетах длительностью свыше полутора лет (Drysdale et al., 1992, 1996; Bartsev et al., 1996a, b). Таким образом, техническая целесообразность применения космических оранжерей для марсианской экспедиции и последующих еще более длительных космических полетов не вызывает сомнений. Пока, к



сожалению, не представлено достаточно убедительных данных о благотворном влиянии вегетирующих растений на психофизиологические характеристики организма человека в условиях длительного космического полета, хотя есть все основания это предполагать. Необходимо дополнительно исследовать состояние экипажей в условиях длительной изоляции в помещениях с оранжерейными установками. Однако даже накопленные на сегодняшний день данные не оставляют сомнений в том, что оранжереи для выращивания зеленных культур в скором времени станут неслучайной принадлежностью как Международной космической станции, так и еще только строящихся космических аппаратов. По мнению авторов, было бы целесообразно постепенно увеличивать степень замкнутости по пище в СЖО на Международной космической станции, в первую очередь за счет увеличения на борту объема производства растительной пищи. Это помогло бы отработать нужные технологии и снизить риск проявления каких-либо нежелательных эффектов в длительных автономных полетах. Мы полагаем, что эта задача должна являться одной из самых главных для МКС по мере наращивания на ней энергетических ресурсов.

К сожалению, внедрение производственных космических оранжерей на МКС идет недопустимо медленно, что может привести к тому, что производство растительной пищи не будет в достаточной степени отработано к моменту, когда ресурс оборудования МКС будет исчерпан, или даже к старту экспедиции к Марсу. Например, на борту МКС пока не нашли применения такие перспективные технологические приемы, как организация конвейерного посева и выращивание самораздвигающихся посевов на выпуклой посадочной поверхности, не отработаны методы корневого снабжения, минимизирующие объем и массу корневых модулей, не решены проблемы регенерации использованного почвозаменителя и переработки растительных отходов. Для экспериментальной отработки конструктивных компонентов оранжерей и технологий культивирования растений, которая может быть проведена на борту МКС, потребуется, по нашим оценкам, не менее 10 лет. В настоящее время целый ряд зарубежных компаний в США, Франции, Японии и других странах продолжают активно работать над созданием исследовательских космических оранжерей, довольно близких по конструкции, но не использующих перспективные для производства растительной пищи технологии.

Авторы надеются, что эта книга поможет привлечь внимание специалистов к одной из насущных задач пилотируемой космонавтики – созданию оборудования для выращивания растений в условиях космического полета в количестве, достаточном для существенного пополнения рациона питания космонавтов. В качестве первого шага необходимо было бы создать салатную оранжерею, для которой уже найдены многие

технические решения. Авторы также надеются внести вклад в решение этой задачи. Следующим этапом могла бы стать более объемная производственная овощная оранжерея, при условии, если будут выделены необходимые бортовые ресурсы на МКС или на марсианском транспортном корабле. Чрезвычайно важным представляется и продолжение наземной отработки оранжерей и технологий культивирования растений для планетных баз с отличными от земной силой тяжести и длительностью суток. Безусловно, перечисленные задачи следовало бы решать совместными усилиями специалистов различных стран, уже накопившими значительный опыт в создании аппаратуры космических оранжерей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамова В.М. К определению допустимых доз для семян. Вопросы радиобиологии и биологического действия цитостатических препаратов. Т. 3. Томск, 1971, с. 172.
2. Адамович Б. А., Горшенин В. А. Жизнь вне Земли. М., 1997, 591 с.
3. Алпатов А.М., Антипов В.В. Заключение. Результаты исследований на биоспутниках. М., Наука, 1992, с. 418-419.
4. Аникеева И.Д., Акатов Ю.А., Ваулина Э.Н. и др. Радиобиологические исследования с семенами растений на биоспутнике «Космос-1887». Результаты исследований на биоспутниках. М., Наука, 1992, с. 402-407.
5. Анисимов О.Л., Луканин А.В. и др. Установка для выращивания растений. А. с. СССР № 1034681, 1983 г.
6. Барышнев Ю.П., Беспрозванный Р.Л., Привин М.Р. Вегетационные климатические установки зарубежных фирм. Сборник трудов Агрофизического института. 1976. Вып. 38, с. 144-170.
7. Бегров В.В. Уравнение спирали для раздвижения растений в спирально-лучевом культиваторе. Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1975. Т. 9, № 1, с. 36-41.
8. Березовский Б. А., Данилов В. Н., Кортнев А. В., Коссов О. А., Машинский А. Л., Травкин С. И., Якимец В. Н. Формирование наборов высших растений для замкнутой биотехнической системы жизнеобеспечения. М. 1997. 81 с.
9. Беркович Ю.А., Корбут В.Л., Норкин К.Б., Сулова О.Б. Некоторые свойства растений как объекта оптимизации в шаговых экстремальных системах. В кн. Вопросы кибернетики: адаптация в системах со сложной организацией. М. 1977. С. 82-85.
10. Беркович Ю.А., Корбут В.Л., Сулова О.Б. Адаптивная оптимизация газообмена растений в герметичном фитотроне. Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1979. № 4, с. 70-73.
11. Беркович Ю.А. Многомерная дискретная система оптимизации фотосинтетической продуктивности растений. В кн.: Проблемы оптимизации в биотехнических системах с использованием вычислительной техники. М. 1981. С. 90-116.
12. Беркович Ю.А., Корбут В.Л., Павловский В.И. О преимуществах космических оранжерей с криволинейной посадочной поверхностью. Сб.: «Космическая

- биология и авиакосмическая медицина», VII Всесоюзная конф. по космической биологии и авиакосмической медицине, Москва-Калуга, 1982. С. 188-189.
13. Беркович Ю. А., Корбут В. Л., Павловский В. И. Оранжереи с криволинейной посадочной поверхностью. Космическая биология и авиакосмическая медицина, 1985, № 6, с. 77-80.
  14. Беркович Ю. А., Следь В. Д. Оценка разового воздействия аммиака на фотосинтез растений салата в условиях герметичного фитотрона. Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1989. № 2, с. 67-70.
  15. Беркович Ю. А., Дерендяева Т. А., Иванова И. Е. Исследование воздействия аммиака в воздушной среде на посев растений. В кн.: «Космическая биология и авиакосмическая медицина». Труды IX Всесоюзной конференции по космической биологии и авиакосмической медицине. Москва-Калуга. 1990. С. 405-406.
  16. Беркович Ю. А. Экспериментально-теоретическое обоснование структуры, функций, технологических принципов функционирования биологических звеньев в общем комплексе физико-химических СОЖ разного назначения. Отчёт ИМБП. М. 1990. 139 с.
  17. Беркович Ю. А. и др. Изучение влияния гидрофизических факторов корнеобитаемой зоны на развитие и структуру высших растений. Отчет ИМБП по контракту NAS-15-10110, этап 4, 1996. 27 с.
  18. Беркович Ю. А. Изучение влияния гидрофизических факторов корнеобитаемой среды на развитие и структуру высших растений. Отчет ИМБП по контракту NAS-15-10110, этап 3, 1996. 34 с.
  19. Беркович Ю. А. и др. Изучение влияния гидрофизических факторов корнеобитаемой зоны на развитие и структуру высших растений. Заключительный отчет ИМБП по контракту NAS-15-10110, 1997. 120 с.
  20. Беркович Ю. А., Кривобок Н. М., Кривобок С. М., Синяк Ю. Е., Захаров С. Б., Магусевич В. В. Характеристики некоторых искусственных заменителей почвы для космических оранжерей типа «Свет». Авиакосмическая и экологическая медицина. 1997. Т. 31. № 6. С. 51-55.
  21. Беркович Ю. А., Кривобок Н. М., Смолянина С. О., Иванов В. Б., Жиленкова О. Г., Большакова Л. С. Влияние водного потенциала в корнеобитаемой зоне на продуктивность высших растений. Авиакосмическая и экологическая медицина. 1999. Т. 33, № 2, С. 45-50.
  22. Беркович Ю. А. Выбор режима освещения для космической оранжереи по результатам наземных опытов. Авиакосмическая и экологическая медицина. 2000. Т. 34. № 1, С. 38-44.

23. Беркович Ю.А., Смолянина С.О., Кривобок Н.М. Космическое земледелие и растениеводство: итоги и перспективы. ЭКОЛОГИЯ И ПОЧВЫ. Избранные лекции 10-й Всероссийской школы. Т. IV. Пушино, ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. С. 48-57.
24. Беркович Ю.А., Смолянина С.О., Кривобок Н.М. Экспериментальное исследование системы корневого питания растений с периодической реверсивной подачей воды для космических оранжерей. Авиакосмическая и экологическая медицина. 2000. Т. 34, № 2. С. 47-52.
25. Беркович Ю.А., Кривобок Н.М., Синяк Ю.Е., Смолянина С.О., Григорьев Ю.И., Романов С.Ю., Гузенберг А.С. Проблема создания салатной оранжереи для Международной космической станции и последующих межпланетных полетов. Авиакосмическая и экологическая медицина. 2002. Т. 36, № 5. С. 8-12.
26. Бобков В.Г. и др. Радиационная безопасность при космических полетах. М., Атомиздат, 1967.
27. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. Под ред. П.Г. Романкова. М.–Л.: Химия, 1956. 286 с.
28. Броди Дж. Земледелие космического века. Америка в иллюстрациях. 1980. № 285. С.15-19.
29. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М., МГУ, 1973, 112 с.
30. Варфоломеев Л.П. Светодиоды и их применение. Новости светотехники, вып. 5. М. 1998. 16 с.
31. Велигора Дж. Тепловой баланс человека в космическом полете. Космическая биология и медицина. Т. 2. С. 100-127. Москва-Вашингтон, Наука, 1994.
32. Верховский М.И., Кауров Б.С., Мулкиджанян А.Н., Следь В.Д., Черепанов Д.А., Шинкарев В.П. Исследование фотосинтетического электронного транспорта с помощью редокс зондов. Биохимия. 1984. Т. 49, Вып. 3. С. 394-402.
33. Веселова Т.В., Веселовский В.А., Чернавский Д.С. Стресс у растений. МГУ. 1993. 145 с.
34. Викторов А.Н., Новикова Н.Д., Дешева Е.А. и др. Сравнительная оценка биологических свойств микроорганизмов в орбитальном комплексе «Мир» в разные сроки эксплуатации. Авиакосмическая и экологическая медицина, 1998. № 2. С. 61-68.
35. Волгин В.Д., Кривобок С.М. Некоторые особенности течения газа через смоченные пористые перегородки. Инженерно-физический журнал. 1979. Т. 37, № 3, С. 443-448.

36. Воронин А. Д. Основы физики почв. МГУ. 1986. 344 с.?
37. Воронин А. Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М. 1984.
38. Газенко О. Г., Кальвин М. (ред.) Космическое пространство как среда обитания. Основы космической биологии и медицины. Т. 1. М., Наука, 1975. 425 с.
39. Газенко О. Г., Кальвин М. (ред.) Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. Основы космической биологии и медицины. Т. 2. М., кн. 1. Наука, 1975. 425 с.
40. Газенко О. Г., Кальвин М. (ред.) Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. Основы космической биологии и медицины. Т. 2. М., кн. 2. Наука, 1975. 449 с.
41. Газенко О. Г., Ф. А. Цандер и современное состояние разработок биологических систем жизнеобеспечения (БСЖО). В кн.: «Из истории ракетно-космической науки и техники». Вып. 2. М., НИЕТ РАН, 1998. С. 3-21.
42. Гачинский Э. И., Дроздов А. И., Черкашин М. Ю. Адаптация в непрерывных системах автоматического поиска. М. 1991. 129 с.
43. Герцузский Д. Ф. и др. Биологическое действие протонов высоких энергий. М. Атомиздат. 1967.
44. Гительзон И. И., Ковров Б. Г., Лисовский Г. М. и др. Экспериментальные экологические системы, включающие человека. Проблемы космической биологии. Т. 28. М., Наука, 1975. 312 с.
45. Гительзон И. И., Терсков И. А., Ковров Б. Г. и др. Проблемы создания биологических систем жизнеобеспечения. Материалы IX Всесоюзного совещания по вопросу круговорота веществ в замкнутой системе на основе жизнедеятельности низших организмов. Киев, 1976. с. 26-31.
46. Глобус А. Н. Экспериментальная гидрофизика почв. Л. 1969, 232 с.
47. Головин В. Н., Чучкин В. Г., Чернобровкин С. А. Устройство для выращивания растений. А. с. СССР № 888878 от 15.07.84.
48. ГОСТ Р 50804-95 «Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования». М. 1995. 117 с.
49. Григорьев Ю. Г. Космическая радиобиология. М., Энергоатомиздат. 1982. 176 с.
50. Гринева Г. М. Регуляция метаболизма растений при недостатке кислорода. М., Наука. 1975. 279 с.
51. Гришин Ю. И. Роль витаминной оранжереи в стабилизации трофической функции экипажа марсианской экспедиции. Авиакосмическая и экологическая медицина. 1993. № 3. С. 10-15.

52. Гришин Ю.И., Калинин Ю.Т., Карпов А.М. Некоторые биотехнологические и гигиенические аспекты применения натриевых световых облучателей в космических системах жизнеобеспечения. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 1999. Т. 33, №5. С.8-16.
53. Гродзинский Д.М. Радиобиология растений. Киев. 1989. 384 с.
54. Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды. М., 1979. 200 с.
55. Дадыкин В.П., Ковадло Л.С. О влиянии вибрации на семена. *Физиология растений*. 1976. Т. 26, №2. С. 17-24.
56. Дарис Н. Способ и устройство для увеличения расстояния между растениями по мере их роста. Патент США №4216618. Кл. 47-65, 12.08.80.
57. Делоне Н.Л., Антипов В.В., Морозова Е.М. и др. Стимуляция роста у некоторых биологических объектов под воздействием вертикальной вибрации. *Космические исследования*. 1968. № 6. 788 с.
58. Дель Дюка М., Конеччи Ю. Системы жизнеобеспечения космических кораблей и скафандров. М. 1967. 77 с.
59. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. — М.: Наука, 1987. 398 с.
60. Дешева Е.А. Микроскопические грибы как фактор экологического риска при многолетней эксплуатации орбитальной станции. Автореферат дис. канд. биол. наук, Москва, 1999. 31 с.
61. Джеймс Д., Коулман М. Токсическое действие газообразных примесей и аэрозолей. *Космическая биология и медицина*. Москва-Вашингтон, Наука, 1994. Т. 2. С. 67-100.
62. Документ 27 КСМ.0000-ОПЗ1. РКК Энергия. 1999 г.
63. Драгомирецкий Ю.А. Лечение злаками. Донецк, изд-во Сталкер.1998. 320 с.
64. Дресслер Х.Г. Влияние загрязнений воздуха на растительность. М. 1981. 164 с.
65. Дроздов С.Н., Курец В.К., Титов А.Ф. Терморезистентность активно вегетирующих растений. *Л*. 1984. 167 с.
66. Дроздов А.И. Разработка и исследование систем автоматической оптимизации многокоординатных инерционных объектов. Автореферат канд. дисс. М. 1988. 23 с.
67. Дубинин Н.П. (ред.) Биологические исследования на орбитальных станциях «Салют». М., «Наука», 1984. 248 с.
68. Енохович А.С. Справочник по физике и технике. Изд. 2-е, М., Просвещение, 1983. 119 с.

69. Ермаков Е. И. Теория и методы интенсивного культивирования растений в регулируемых условиях (на примере овощных культур). Автореферат докторск. дисс. 1887. Ленинград, Агрофизический НИИ. 49 с.
70. Ерохин А. Н., Беркович Ю. А. Анализ характеристик салатной космической оранжереи с блокомосвещения на светоизлучающих диодах. Авиакосмическая и экологическая медицина. 2005. Т. 39, № 1, с. 36-43.
71. Зубкова Т. А., Карпачевский Л. О. Матричная организация почв. МГУ, 2001. 296 с.
72. Иванова Т. Н., Костов П. Т., Кынчев Н. А., Славчев С. Г. Исследование гидродинамических свойств субстрата для выращивания растений в условиях невесомости. XX совещание постоянно действующей группы социалистических стран по космической биологии и медицине. Тезисы докладов II. Берлин, ГДР, 18.05-22.05. 1987, с. 191-202.
73. Иванова Т., Дандалов И., Сапунова С., Беркович Ю. А., Машинский А. Л. Итоги эксплуатации космической оранжереи СВЕТ в условиях орбитальной станции МИР. Труды XXIV Совещания постоянной рабочей группы по космической биологии и медицине стран-участниц программы «Интеркосмос», Ленинград, 1991. С. 59.
74. Ильин Е. А., Парфенов Г. П. Биологические исследования на биоспутниках «Космос». М., Наука, 1979. 240 с.
75. Илькун Г. М. Загрязнители атмосферы и растение. Киев. 1978. 286 с.
76. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Химия, М., 1971. 784 с.
77. Келлер Н. Д., Липов Ю. Н., Чучкин В. Г. и др. Вегетационный сосуд для выращивания высших растений. А. С. СССР № 352638 от 29.09.72.
78. Кислюк И. М., Палеева Т. В. Два типа изменений температурной зависимости фотосинтеза в ответ на повышение температуры среды. Физиология растений. 1990. Т. 37, вып. 3, С. 555-560.
79. Клешнин А. Ф. Растение и свет. 1954. Изд-во АН СССР, Ленинград, 456 с.
80. Ковров Б. Г., Мартыненко Л. Л. Разработка витаминной оранжереи как биологического элемента системы жизнеобеспечения. К. Э. Циолковский и современные проблемы космической биологии. Труды XIV научных чтений по разработке научного наследия К. Э. Циолковского. М. 1981. С. 99-103.
81. Корбут В. Л., Беркович Ю. А., Норкин К. Б. Высшие растения как объект управления. В кн. Управление продуктивностью агроэкологических систем. Л. 1976. Труды АФИ, вып. 38. С. 23-29.



82. Корбут В.Л. Оптимизация продуктивности растений в биотехнических системах. В кн.: Проблемы оптимизации в биотехнических системах с использованием вычислительной техники. М. 1981. С.5-32.
83. Кривобок Н.М. Разработка метода и аппаратуры корневого снабжения для салатных оранжерей в системах жизнеобеспечения экипажей космических летательных аппаратов. Автореф. канд. дисс. М. ГНЦ РФ — ИМБИ РАН. 2004. 24 с.
84. Кудрявцев Л. Д. Краткий курс математического анализа. М. 1989. С. 388-393.
85. Куперман Ф.М., Дворянкин Ф.А., Ростовцева Е.И. Этапы формирования органов плодоношения злаков. М. 1955. 338 с.
86. Курец В.К., Попов Э.Г. Статистическое моделирование системы связей растение-среда. Л. 1991. 152 с.
87. Кустов В.В., Тиунов Л.А. Токсикология продуктов жизнедеятельности и их значение в формировании искусственной атмосферы герметизированных помещений. Проблемы космической биологии. Т. 11. М., 1969. С. 17-25.
88. Лауринавичус Р.С., Ярошюс А.В., Марчукайтис А., Швягжде Д.В., Машинский А.Л. Метаболизм растений гороха, выращенных в условиях космического полёта. Биологические исследования на орбитальных станциях «Салют» под ред. Н.П. Дубинина. М., Наука, 1984. 102 с.
89. Левинских М.А. Сравнение эффективности различных методов получения витаминной зелени в условиях космической станции. Авиакосмическая и экологическая медицина, 2002. Т. 33. № 2. С. 23-25.
90. Левинских М.А., Сычев В.Н., Дерендяева Т.А., Сигналова О.Б., Ф.Салсбери, У.Кэмбелл, Д.Бабенхайм. Анализ влияния факторов космического полета на рост и развитие суперкарликовой пшеницы при выращивании в оранжерее «Свет». Авиакосмическая и экологическая медицина, 1999. Т. 33, № 2. С. 37-41.
91. Левинских М.А., Сычев В.Н., Дерендяева Т.А., Сигналова О.Б., Подольский И.Г. и др. Выращивание пшеницы «от семени до семени» в условиях космического полета. Авиакосмическая и экологическая медицина, 2000. Т. 34, № 4. С. 44-49.
92. Левинских М.А., Подольский И.Г., Сычев В.Н., Дерендяева Т.А., Нефёдова Е.Л. Некоторые аспекты культивирования овощных листовых растений в оранжереях обитаемых гермообъектов. В кн: Модельный эксперимент с длительной изоляцией: проблемы и достижения. М. 2001. С. 515-524.
93. Левинских М.А., Сигналова О.Б., Дерендяева Т.А., Ливанская О.Г. и др. Разработка технологии выращивания и выбор овощных листовых культур для космических оранжерей. Авиакосмическая и экологическая медицина, 2001b. Т. 35. № 1. С. 61-67.

94. Литвин Ф.Ф., Синещеков В.А., Бойченко В.А. Соотношение биофизических и физиологических закономерностей начальных стадий фотосинтеза. В кн.: Физиология фотосинтеза. М., 1982. С. 34-54.
95. Максимова Е.Н., Невзгодина Л.В., Каминская Е.В. и др. Влияние тяжелых заряженных частиц галактических космических лучей на семена *LATUCA SATIVA*, экспонированные снаружи биоспутника «Космос-1887». Результаты исследований на биоспутниках. М., Наука, 1992. С.413-417.
96. Малиновский А.В., Беркович Ю.А., Тиме И.В. Математическая модель для описания изменения фотосинтеза высших растений в пространстве параметров среды. Физиология растений. 1984. Т. 2, вып. 3. С.421-426.
97. Малкин В.Б. Барометрическое давление, газовый состав. Космическая биология и медицина. Москва-Вашингтон, Наука, 1994. Т.2. С. 9-66.
98. Мановцев Г.А. К 30-летию годового медико-технического эксперимента с участием человека. Авиакосмич. и экологич. медицина. 1997. №6. С. 72-73.
99. Матусевич В.В., Хирсанова И.Ф., Лукашевич Л.И., Солдатов В.С. Влияние кислотности и концентрации питательного раствора на биозоны ионитных субстратов. Доклады АН Беларуси, сер. Химия. 1997. Т. 41, №2. С. 64-67.
100. Машинский А.Л., Коньшин Н.И., Нечитайло Г.С. Приборы и методы для проведения биологических исследований по космической биофизике. Пушино, 1976. С.153-165.
101. Машинский А.Л., Нечитайло Г.С., Ваулина Э.Н. Космическая биология. М., Знание, 1988. 53 с.
102. Медведев С.С. Физиологические основы полярности растений. С. — Петербург, 1996. 159 с.
103. Мелешко Г.И., Шепелев Е.Я. Невесомость как условие реализации замкнутых экологических систем жизнеобеспечения в космическом полёте. Результаты исследований на биоспутниках. М. Наука, 1992. С. 370-378.
104. Мелешко Г.И., Шепелев Е.Я. Биологические системы жизнеобеспечения. (Замкнутые экологические системы) М., Синтез, 1994. 280 с.
105. Мелешко Г.И., Шепелев Е.Я., Авернер М.М., Волк Т. Биологические системы жизнеобеспечения человека. Космическая биология и медицина. Т. 2. С. 499-558. Москва-Вашингтон, Наука, 1994.
106. Мельников Е.С., Посадский А.А. Спирально-лучевое устройство для раздвижения растений. А. с. СССР № 532368. 1974.
107. Менькин Е.В. Разработка методики анализа эффективности технологий и синтеза технологической структуры СЖО с учетом неопределенности в исходной информации. Автореферат канд. диссертации. М. 1999.

108. Меркис А. И., Лауринавичус Р. С. Полный цикл индивидуального развития *Arabidopsis thaliana* Науху на борту орбитальной станции «Салют». Доклады академии наук. 1983. Т. 271. № 2. С. 509-512.
109. Митрикас М. М., Цетлин М. М. Проблемы обеспечения радиационного контроля на ОК «Мир» в 22-м цикле солнечной активности. Космические исследования. 2000, № 2. С. 121-126.
110. Мищенко Л. Т. Сравнительная характеристика репродукции вируса полосатой мозаики пшеницы в растениях *Triticum aestivum* L. озимых и яровых сортов в природных агроценозах и в условиях клиностатирования. Авиакосмическая и экологическая медицина. Т. 38. № 3. 2004. С. 36-41.
111. Морозов Г. И., Миронов А. С. Некоторые особенности проектирования перспективных систем жизнеобеспечения. Сб. трудов 1-й научной конференции по вопросам создания систем жизнеобеспечения космических кораблей и планетных станций. Т. 1. М., ИМБП МЗ СССР, 1970. С. 7.
112. Муромцев Н. А. Тензиометры, как почвенные влагомеры и индикаторы полива растений. М. 1981, 31 с.
113. Муромцев Н. А., Братчиков И. М. Эксплуатационные свойства датчиков тензиометров. Почвоведение. 1981, № 10. С. 38-45.
114. Налимов В. В. Теория эксперимента. М., 1971.
115. Никишин Л., Пановко М. «Ноев ковчег» космической эры. Эхо планеты. № 2. 1989. С. 44-47.
116. Николаевский В. С. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск. 1979. 280 с.
117. Никольский Б. П. (ред.) Справочник химика. Изд. 2, тт. 3 и 5. Л. 1968.
118. Нольде Т. В., Пепеляев Ю. В., Сухоруков О. А., Шепелев Е. Я. Анализ микропримесей в атмосфере, формируемой средой обитания замкнутой системы «человек — высшие растения — низшие растения». Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1983. № 2. С. 76-79.
119. Парфенов Г. П. Невесомость и элементарные биологические процессы. М. — Л. Наука, 1988. 320 с.
120. Пеклов А. А. Кондиционирование воздуха. Изд. 2. Киев. 1967. 296 с.
121. Пинский Д. Л. Ионообменные процессы в почвах. Пушино. 1997. 166 с.
122. Подольский И. Г., Сычев В. Н., Левинских М. А., Стругов О. М., Бингхем Г. Некоторые особенности жидкостного обеспечения корнеобитаемой среды при культивировании растений в условиях микрогравитации. Авиакосмич. и экологич. Медицина. 1998. Т. 32. № 2. С. 36-43.

123. Подольский И. Г. Исследование и разработка метода и оборудования для регулирования водно-воздушного режима капиллярно-пористых тел (корнеобитаемых сред) в оранжерейных устройствах для условий микрогравитации. Автореферат канд. дисс. ИМБП, 2000. 25 с.
124. Покровский А. А., Самсонов М. А. (ред.) Справочник по диетологии. М. 1981. 312 с.
125. Полевой В. В. Физиология растений. М. Высш. шк. 1989. 464 с.
126. Попов И. Г., Бычков В. П. Питание космонавтов. Космическая биология и медицина. Москва-Вашингтон, Наука, 1994. Т. 2. С. 313-336.
127. Рабинович Е. Фотосинтез. М. 1951. 648 с.
128. Ракитин Ю. В. Химические регуляторы жизнедеятельности растений. Избранные труды. М. 1983. С. 38-48.
129. Растворова О. Г. Физика почв. Л., ЛГУ, 1983. 186 с.
130. Растргин Л. А. Системы экстремального управления. М. 1974. 632 с.
131. Родимов Б. И. Снеговая вода — стимулятор роста и продуктивности животных и растений. Сельское хозяйство Сибири. 1961. № 7. 66 с.
132. Родимов Б. И. Действие снеговой воды на живые организмы. Сельскохозяйственное производство Сибири и Дальнего Востока. Омск, № 4, 1962. С. 56-57.
133. Рождественский В. И., Клешнин А. Ф. Управляемое культивирование растений в искусственной среде. М. 1980. 200 с.
134. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова. Л., 1975. 278 с.
135. Савина В. П., Кузнецова Т. И. Источники загрязнения атмосферы кабин микропримесями и их токсикологическая оценка. Проблемы космической биологии. Т. 42. М., 1980. С. 11-42.
136. Садовникова Л. К. Химические свойства почв и окружающая среда. Экология и почвы. Избранные лекции VIII-IX Всероссийских школ (1998-1999 гг). Москва, 1999. Т. 3. С. 110-116.
137. Саноцкий И. В., Уланова И. П. Критерии вредности в гигиене и токсикологии при оценке опасности химических соединений. М. 1975. 356 с.
138. Серебрякова Л. К. Допустимые концентрации токсических веществ в атмосферном воздухе для древесной растительности. В: Газоустойчивость растений. 1980. Новосибирск. С. 184-185.
139. Сидько Ф. Я., Шарупич Т. С., Марков И. Е., Шарупич В. П. Исследование систем облучения растений в светонепроницаемых теплицах. Проблемы светокультуры растений. Труды Всесоюзной конференции, Симферополь, 1980. С. 12-16.

140. Симитчиев Х., Каназирска В., Милиев К., Джуров П. Нови технологии в оранжерийното зеленчукопроизводство на хидропонна основа. 1983. Пловдив. 155 с.
141. Синяк Ю.Е., Гайдадымов В.Б. Бездейтериевая вода: возможность получения и использования на борту пилотируемых летательных аппаратов. Космическая биология и авиакосмическая медицина. Тезисы докладов 10-й Конференции. Москва, 7-10 июня 1994. С. 304-305.
142. Синяк Ю.Е., Гайдадымов В.Б. Бездейтериевая вода в системах жизнеобеспечения экипажа марсианской экспедиции. Организм и окружающая среда: адаптация к экстремальным условиям. Материалы конференции. Москва, 3-5 ноября, 2003. С. 315-317.
143. Синяк Ю.Е., Григорьев А.И. Оптимальный изотопный состав биогенных химических элементов на борту пилотируемых космических аппаратов. Авиакосмическая и экологическая медицина. 1996. Т. 30. № 4. С. 26-31.
144. Синяк Ю.Е., Гурьева Т.С., Гайдадымов В.Б., Медникова Е.И., Лебедева З.Н., Гуськова Е.И. Метод получения бездейтериевой воды и исследование ее влияния на физиологический статус японского перепела. Космическая биология и авиакосмическая медицина. Тезисы докладов XI конференции, т. 2. Москва, 22-26 июня 1998. С. 201-202.
145. Синяк Ю.Е., Левинских М.А., Гайдадымов В.Б., Гуськова Е.И., Сигналова О.Б., Дерендяева Т.А. Влияние воды с пониженным содержанием дейтерия на культивирование высших растений: *Arabidopsis thaliana* и *Brassica rapa*. Организм и окружающая среда: адаптация к экстремальным условиям. Материалы конференции, т. 2. Москва, 26-29 ноября, 2000. С. 90-92.
146. Синяк Ю.Е., Турусов В.С., Григорьев А.И., Заридзе Д.Г., Гайдадымов В.Б., Гуськова Е.И., Антошина Е.Е., Горькова Т.Г., Труханова Л.С. «Бездейтериевая» вода в качестве противоопухолевого средства применительно к условиям марсианской экспедиции. Организм и окружающая среда: адаптация к экстремальным условиям. Материалы конференции. Москва, 3-5 ноября, 2003. С. 317-318.
147. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л. 1981. 185 с.
148. Скурихин И.М. (ред) Химический состав пищевых продуктов. М. 1984. 327 с.
149. Смирнов Н.А. (ред.). Справочник бригадира-овощевода защищенного грунта. М. 1980. 192 с.
150. Смит. У.Х. Лес и атмосфера. М., 1985. 429 с.
151. Смолянина С.О., Беркович Ю.А., Кривобок Н.М., Кривобок С.М. Связь некоторых факторов внешней среды с нарушениями в онтогенезе растений пше-

- ницы применительно к условиям космической оранжереи. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2000, № 3. С. 61-65.
152. Смолянина С.О., Беркович Ю.А., Кривобок Н.М., Иванов В.Б. Различия в росте и развитии растений, выращиваемых в гравитационном поле Земли при естественной и инвертной ориентации. *Известия Академии наук, серия Биология*, 2003, № 6. С. 662-669.
153. Солдатов В.С., Пёрышкина Н.Г., Хорошко Р.П. Ионитные почвы. Минск. 1978. 271 с.
154. Судницын И.И., Сидорова М.А. Измерение коэффициентов влагопроводности ненасыщенных влагой почв методом стационарных потоков. М. МГУ, 1994. С. 3-9.
155. Судницын И.И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. МГУ, 1979. 254 с.
156. Сычев В.Н., Левинских М.А., Гурьева Т.С. и др. Биологические исследования. Исследования замкнутых экологических систем жизнеобеспечения. В кн.: Орбитальная станция «Мир», т. 2, 2002. С. 306-365.
157. Сычев В.Н., Левинских М.А., Дерендяева Т.А. и др. Выращивание пшеницы «От семени до семени» в условиях космического полета. *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 2000, Т. 34, № 4. С.37-43.
158. Сычев В.Н., Шепелев Е.Я., Мелешко Г.И. и др. Биологические системы жизнеобеспечения: исследования на борту орбитального комплекса «Мир». *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 1999. Т. 33, № 1. С. 10-16.
159. Терсков И.А., Гительзон И.И., Ковров Б.Г. и др. Замкнутая система: человек-высшие растения. Новосибирск, Наука, 1979, 159 с.
160. Тиме И.В. Математические проблемы в задачах оптимизации фотосинтетической продуктивности растений. В кн.: Проблемы оптимизации в биотехнических системах с использованием вычислительной техники. М. 1981. С. 69-90.
161. Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Лисовский Г.М. Светокультура растений. Новосибирск. 2000. 213 с.
162. Тихомиров А.А. Фотобиофизика. Биофизические и экологические аспекты. Красноярск, 2002. 111 с.
163. Фишер Д.А., Шайдоров Ю.И. Изучение биологического действия вибрации на растения. *Космическая биология и авиакосмическая медицина*. 1976. № 4.
164. Флейшман Б.В. Основы системологии. М., 1977, 288 с.
165. Хованская Н.В. Рост и развитие пекинской капусты сорта Хибинская в условиях искусственного освещения. Потенциальная продуктивность растений. Вып. 39. М. 1976. С.72-77.

166. Цветкова И. В., Вильямс М. В. Способ минерального питания растений. А. с. СССР № 626731. 1978.
167. Цетлин В. В., Бондаренко В. А., Дешева Е. А., Митрикас В. Г., Новикова Н. Д., Носовский А. М., Поликарпов Н. А. Результаты исследований влияния радиационных условий на среду обитания орбитальной станции и перспективы использования их для решения земных экологических проблем. — В сб. Космические технологии — человеку на Земле. Материалы научных чтений, посвященных 40-летию первого полета человека в космос. М. Политехнический музей. 2001. С. 14-18.
168. Цетлин В. В., Дешева Е. А. Влияние хронического облучения низкими дозами космического ионизирующего излучения на характер формирования микробного сообщества в среде обитания орбитальных станций. Радиобиология. Радиоэкология, 2003, № 2. С. 172-175.
169. Циолковский К. Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами. Соб. соч. Т. 2, М., 1954. С. 100-139.
170. Циолковский К. Э. Вне Земли. Грезы о Земле и небе. Научно-фантастические произведения. Тула, 1986. С. 127-340.
171. Циолковский К. Э. Жизнь в межзвездной среде. Грезы о Земле и небе. Научно-фантастические произведения. Тула, 1986. С. 254-256.
172. Чиркова Т. В. Пути адаптации растений к гипоксии и аноксии. Издательство ленинградского университета. 1988. 245 с.
173. Чучкин В. Г. Спиральная оранжерея. Природа, № 7. 1967. С. 58-69.
174. Чучкин В. Г., Костецкий А. В., Головин В. Н. и др. Оценка целесообразности включения звена высших растений в замкнутые системы жизнеобеспечения. Проблемы создания биолого-технических систем жизнеобеспечения человека. Новосибирск, Наука, 1975. С. 5-12.
175. Чучкин В. Г. и др. Исследование эффективности конвейерного культивирования растений кассетным способом при искусственном и естественном освещении. Отчет ИМБП № 1495, тт. 1, 2. 1983.
176. Чучкин В. Г. и др. Экспериментальное обоснование технологии овощных растений на различных субстратах для обитаемых космических объектов. Отчет ИМБП № 1662. Т. 3. 1986.
177. Швецов С. Г., Мудрак Е. И. Высокоинтенсивные облучательные приборы для селекционных и промышленных теплиц. Проблемы светокультуры растений. Труды Всесоюзной конференции, Симферополь. 1980. С. 31-33.
178. Шейн Е. В., Карпачевский Л. О. Толковый словарь по физике почв. М.: ГЕОС, 2003.

179. Шейн Е. В., Березин П. Н., Капинос В. А. Задачник по физике почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 80 с.
180. Шепелев Е. Я. Биологические системы жизнеобеспечения. Основы космической биологии и медицины. М. Наука, 1975. Т. 3. С. 277-313.
181. Шульгин И. Я. Растение и солнце. Л., 1973.
182. Яздовский В. И. На тропах Вселенной. М., Фирма «Слово», 1996. 288 с.
183. Abeles F., Morgan P., Saltveit M. Ethylen in Plant Biology. Vol. 2. Academic Press. San Diego, USA. 1992.
184. Alling A., Nelson M., Silverstone S. Life under glass. The inside story of Biosphere 2. 1993. The Biosphere Press, USA. 256 p.
185. Andre M., Massimino D. Growth of plants at reduced pressure; Experiments in wheat technological advantages and constraints. Adv. Space Res. 1992, 12 (5), pp. 97-106.
186. Andre M. Growth of wheat under one tenth of atmospheric pressure. Proceed. of 31st Scientific Assembly of COSPAR, 14-21 July, 1996. Paper F4.3-0004.
187. Aydogan S., Orcun S., Blau G., Pekny J. F., Reklaitis G. a prototype simulation based optimization approach to model and design an advanced life support system. 2004. SAE technical paper. 2004-01-2576.
188. Barta D., Castillo J. Preliminary designs of the biomass production system for life support systems test complex. 2001. SAE technical paper. 2001-01-2319.
189. Barta D. Biomass Production System design review. BIO-Plex. Jonson Space Center. Houston. 1996. P. 62.
190. Barta D., Edeen M. Early Human Testing Initiative. Phase 1. Final Report. JSC-33636, pp. 1-41. 1996.
191. Barta D., Henderson K. Performance of wheat for air revitalization and food production during the Lunar-Mars life support test project phase III test. SAE technical paper. 981704, 1998.
192. Bartsev S. I., Gitelson J. I., Mezhevikin V. V., Okhonin V. A. Principle of Lunar Base Life Support System Structure and Operation Regimes Optimization. 1996a. SAE technical paper 961551.
193. Bartsev S. I., Gitelson J. I., Lisovsky G. M., Mezhevikin V. V., Okhonin V. A., Doll S. C., Rao N. S. First level of life support system (LSS) closure: optimization of LSS structure for different functioning times. 1996b. SAE technical paper. 961556.
194. Bartsev S. I., Mezhevikin V. V., Okhonin V. A., Doll S. C., Rao N. S. Life support system designing: principle of optimal reliability. 1996c. SAE technical paper. 961365.



195. Bartsev S. I., Gitelson J. I., Lisovsky G. M., Mezhevikin V. V., Okhonin V. A. Perspectives of different type biological life support systems (BLSS) usage in space missions. *Acta Astronautica*, V.39, No.8, pp. 617-622, 1997a.
196. Bartsev S. I. Life support system power supply optimization. 1997. SAE technical paper. 972299.
197. Bartsev S. I., Mezhevikin V. V., Okhonin V. A. The development of work on life support systems and strategies of space mastering. 1997b. SAE technical paper. 972298.
198. Bartsev S. I., Mezhevikin V. V., Okhonin V. A. Systematic approach to life support system analyses and integration. *Adv. Space Res.* V. 31, No. 7, pp. 1823-1832, 2003.
199. Batten J., Stutte G., Wheeler R. Effect of crop development on biogenic emissions from plant populations grown in closed plant growth chambers. *Phytochemistry*. 1995. V. 39, No. 6, pp. 1351-1357.
200. Batten J., Stutte G., Wheeler R. Volatile organic compounds detected in the atmosphere of NASA's biomass production chamber. *Adv. Space Res.* 1996. V. 18, No 4/5, pp. 189-192.
201. Berkovich Yu. A., Derendyaeva T. A., Ivanova I. E., Mashinskiy A. L., Meleshko G. I., Ivanova T. N. Preliminary Results at the First Stage of the SVET Space Greenhouse Exploitation in Space Flight. Proceedings of the 2-nd micro-symposium SVET-90 on Biotechnology and life supports of the space biology working group, Bulgarian Academy of sciences. 1991, pp. 25-36.
202. Berkovich Yu. A. Instrumentation for plant health and growth in space. *Adv. Space Res.* V. 18, No. 4/5, 1996, pp. 157-162.
203. Berkovich Yu. A., Krivobok N. M., Krivobok S. M., Smolyanina S. O., Ivanov V. B., Zhilenkova O. G., Choochkin V. G., Bolshakova L. S. Evaluation of the effect of lowered water potential in the space greenhouse root module on yield, morphometric and anatomical characteristics of leaf mustard and wheat plants. Biomedical research on the Science-NASA project. Proceedings of 3-rd Russian-American Conference in frame of «Mir-NASA» contract, Huntsvill, AL, November 10-13, 1997a, p. 169.
204. Berkovich Yu. A., Krivobok N. M., Krivobok S. M., Smolyanina S. O. Evaluation of the effect of lowered water potential in a space greenhouse root module on yield and morphometrics of leaf mustard. Proceedings of The 2-nd international aerospace congress, paper IV-22, Moscow, Russia, August 31-September 5, 1997b, p. 119.
205. Berkovich Yu. A., Krivobok N. M., Syniak Yu. E., Zaitsev E. R., Monakhov B. N., Protasov N. N., Abramov L. Kh., Samsonov N. M., Farafonov N. S. Perspectives of developing space greenhouse for the international space station. Proceedings of the Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems. Noordwijk, The Netherlands. ESA SP-400, 1997, pp. 839-844.

206. Berkovich Yu. A., Krivobok N.M., Sinyak Yu. E. Project of conveyer-type space greenhouse for cosmonauts» supply with vitamin greenery. Adv. Space Res. 1998 a. Vol. 22. No. 10, pp. 1401-1405.
207. Berkovich Yu. A., Krivobok N.M., Krivobok S.M. et al. Development of a root feeding system based on fiber ionexchange substrate for space plant growth chamber Vitacycle. Presentation at 3-d International Conference on Life Support @ Biosphere Science, 8-14 January 1998b, Orlando, USA.
208. Berkovich Yu. A., Smolyanina S.O., Krivobok N.M., Krivobok S.M. Effect of lowered water potential in the different root media on yield and morphometrics of higher plants. Presentation on The 8-th All Russian Scientific School «Ecology and Soil». Pushino town, Moscow area, Russia, Sept. 28-Oct. 21998.
209. Berkovich Yu. A. Evaluation of planting surfaces for crop production in microgravity. Adv. Space Res. Vol. 26, No.2, 2000. Pp. 271-279.
210. Berkovich Yu. A., Siniak Yu. E., Samsonov N.M., Bobe L.S., Protasov N.N. Water supply for a space station outfitted with a vitamin greenhouse. Paper IAF/IAA-00-G.4.04. Pp.1-7. Presentation on The 51-st International Astronautical Congress, 2-6 Oct. 2000a. Rio de Janeiro, Brazil.
211. Berkovich Yu. A., Smolyanina S.O., Krivobok N.M., Krivobok S.M. A Comparison of Root Module Designs Relative to Wheat Growth and Development: Defining the requirements for a Space Based Plant Culture System. 2000b. SAE Technical paper. 2000-01-2508.
212. Berkovich Yu. A., Smolyanina S.O., Krivobok N.M. Estimation of efficiency of vitamin conveyor-tipe plant growth facility «Phytocycle» from ground tests. 2001. SAE Technical paper. 2001-01-2424.
213. Berkovich Yu. A., Tynes G.K., Norikane J.H., Levine H.G. Evaluation of an Ebb and Flow Nutrient Delivery Technique Applicable to Growing Plants in Microgravity. 2002. SAE Technical Paper 2002-1-2383.
214. Berkovich Yu. A., Krivobok N.M., Krivobok S.M., Matusevich V.V. and Soldatov V.S. Development of a root feeding system based on a fiber ion-exchange substrate for space plant growth chamber «Vitacycle». Habitation. Vol. 9 Issue 1-2, 2003.
215. Berkovich Yu. A., Chetirkin P.V., Wheeler R.M., Sager J.C. Evaluating and optimizing horticultural regimes in space plant growth facilities. Adv. Space Res. 2004. Vol. 34, pp. 1612-1618.
216. Berkovich Yu. A., Krivobok N.M., Sinyak Yu. E., Smolyanina S.O., Grigoriev Yu. I., Romanov S.Yu., Guissenberg A.S. Developing a vitamin greenhouse for the life support system of the international space station and for future interplanetary missions. Adv. Space Res. 2004a. Vol. 34, pp. 1552-1557.

217. Berry W.L., Goldstein G., Dreschel T.W., Wheeler R.V., Sager J.C., Knott W.V. Water relations, gas exchange, and nutrient response to a long term constant water deficit. *Soil Science*. 1992. Vol. 153, No. 6, pp. 442-451.
218. Berry W., Knight S. Plant Culture in Hydroponics. In: *Plant Growth Chamber Handbook*. Iowa State Univ., USA, 1997, pp. 119-131.
219. Bingham G.E., Shane Topham T., Mulholland J.M. Podolsky I.G. Lada: The ISS plant substrate microgravity testbed. 2002. SAE Technical paper. 2002-01-2388.
220. Bingham G.E., Salisbury F.B., Cambell W.F., Carman J.G., Bubenheim D.L., Yendler B., Sytchev V.N., Berkovitch Yu. A., Levinskikh M. A., Podolsky I.G. The Spacelab-Mir-1 «Greenhouse-2» experiment. *Adv. Space. Res.* 1996. V. 18. № 4/5. Pp. 225-232.
221. Bohm W. *Methods of studiing of root system*. Springer Verlag. 1979, p. 190.
222. Brody J. *Agriculture of Space Century*. America Illustrated. 1980. No.285, pp. 15-19.
223. Brown, C. S., Cox, W. M., Dreschel, T. W., Chetirkin, P.V. The Vacuum-Operated Nutrient Delivery System: Hydroponics for Microgravity. *Hort. Science*, Vol. 27, N 11. 1992, pp. 1183-1185.
224. Bubenheim D.L. Plants for water recycling, oxigen regeneration and food production. *Waste Management & Research*. 1991. No.9. Pp. 435-443.
225. Bucklin R. A., Leary J. D., Rygalov V., Yang Mu, Fowler P. Design parameter for Mars deployable Greenhouses. 2001. SAE Technical paper. 2001-01-2428.
226. Bugbee B.G., Salisbury F.B. Current and potential productivity of wheat for a controlled environment life support system. 1989. *Adv. Space Res.* Vol. 9/8. Pp. 5-15.
227. Bugbee B., Monje O. The Limits of Crop Productivity. *BioScience*, Vol. 42, No. 7, pp 494-502. 1992.
228. Bugbee B. Effects of radiation quality, intensity and duration on photosynthesis and growth. *Proceed. Of International Lighting in Controlled Environments Workshop*, Wiskonsin, USA, March 27-30 1994, pp. 39-50.
229. Bugbee B. The componens of productivity: measuring and modeling plant metabolism. *ASGSB Bulletin*. 1995, 8 (2), pp. 93-104.
230. Bula R., Tibbitts T., Morrow R., Dinauer W. Commercial involvement in the development of space-based plant growing technology. *Adv. Space Res.* Vol. 12. No. 5, 1992, pp. 5-10.
231. Bula R., Tennessen D., Morrow R., Tibbitts T. Light emitting diodes as a plant lighting source. *Proceed. of International Lighting in Controlled Environments Workshop*, Wiskonsin, USA, March 27-30 1994, pp. 255-267.
232. Bunt, A. C. *Physical aspects. Media and Mixes for Container-Grown Plants*. London, Un. win. Hyman, 1988, pp. 47-55.

233. Chagvardieff P., Dimon B., Souleimanov A., Massimino D. Effects of modified atmosphere on crop productivity and quality of harvested products. Proceed. of 31st Scientific Assembly of COSPAR, 14-21 July, 1996. Paper F4.2-00016.
234. Campbell W.F., Salisbury F.B., Bugbee B. et al. Comparative floral development of Mir-grown and ethylene-treated earth-grown SuperDwarf wheat. *J. Plant Physiol.*, vol. 158, pp. 1051-1060. 2001.
235. Chapman D.K., Wells H.W., Levine H.G. Plant growth facility: a recent design provides improved capabilities for use in the Shuttle middeck. 1995. SAE Technical Paper. 951626.
236. Charles-Edwards D.A. *The Mathematics of Photosynthesis and Productivity*. L-NY, 1981.
237. Clawson J., Hoehn A., Stodieck L., Todd P. AG-Pod — The Integration of Existing Technologies for Efficient, Affordable Space Flight Agriculture. 1999. SAE technical paper. 1999-01-2176.
238. Clawson J., Hoehn A., Stodieck L., Todd P., Stoner R. Re-examining Aeroponics for Spaceflight Plant Growth. 2000. SAE Technical Paper 00ICES-360.
239. Cloutier G., Dixon M., Arnold K. Evaluation of sensor technologies for automated control of nutrient solutions in life support systems using higher plants. Proceedings of the Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems. Noordwijk, The Netherlands. ESA SP-400, 1997. Pp. 851-858.
240. Corey K., Barta D., Edeen M., Henninger D., Williamson R. Ethylene evolution by wheat stands in a variable pressure growth chamber with human integration. Proceed. of 31st Scientific Assembly of COSPAR, 14-21 July, 1996. Paper F4.8-0009.
241. Corey K.A., Barta D.J., Henninger D.L. Photosynthesis and respiration of a wheat stand at reduced atmospheric pressure and reduced oxygen. Proceed. of 31st Scientific Assembly of COSPAR, 14-21 July, 1996. Paper F4.6-0009.
242. Corey K., Bates M., Adams S. Carbon dioxide exchange of lettuce plants under hypobaric conditions. *Adv. Space Res.* 1996. Vol. 18, No. 4/5, pp. 265-272.
243. Crabb T.M., Morrow R.C., Frank J. Plant Research Unit-Program Overview. 2001. SAE technical paper. 2001-01-2230.
244. Crabb T.M., Morrow R.C., Frank J.G. Biomass Production System (BPS) plant growth unit. Proceed. of 32nd Scientific Assembly of COSPAR, 12-19 July, 1998. Paper F4.4-0006.
245. Cuello J., Sadler Ph., Jack D., Ono E., Jordan K. Evaluation of light transmission and distribution materials for lunar and martian bioregenerative life support. *Life Support & Biosphere Science*. 1998. Vol. 5, pp. 389-402.

246. Cuello J., Darren J., Sadler Ph., Nakamura T. Hybrid Solar and Artificial Lighting (HYSAL): Next-Generation Lighting Strategy for Bioregenerative Advanced Life Support. 1999. SAE technical paper. 1999-01-2104.
247. Cuello J., Yu Yang, S. Kuwahara, E. Ono, K. Jordan, T. Nakamura, and H. Watanabe. Plant Hardware Equipped with Hybrid Lighting: Combining Solar Irradiance with Xenon-Metal Halide Lamps or Light-Emitting Diodes for Life Support in Space. 2001. SAE technical paper. 2001-01-2423.
248. Daunicht H.J., Brinkjans. Gas exchange and growth of plants under reduced air pressure. *Adv. Space Res.* 1992, 12 (5), pp. 107-114.
249. Daunicht H., Brinkjans H. Plant responses to reduced air pressure: advanced techniques and results. *Adv. Space Res.* 1996. Vol. 18, No. 4/5, pp. 273-281.
250. Davis N. Principles of light energy management. *Proceed. Of International Lighting in Controlled Environments Workshop, Wiskonsin, USA, March 27-30 1994*, pp 351-365.
251. Douger T., Bugbee B. Is blue light good or bad for plants? *Life Support & Biosphere Science.* 1998. Vol. 5, pp. 129-136.
252. Douger T., Bugbee B. Toward an understanding of blue light effects on diverse species: implications for advanced life support systems. 1999. SAE technical paper. 1999-01-2108.
253. Downs R., Krizek T. Air Movement. In: *Plant Growth Chamber Handbook.* Iowa State Univ., USA, 1997, pp. 87-104.
254. Dreschel T.W., Sager, J.C. Control of Water and nutrients using a porous Tube: A Method for growing Plants in Space. *Hort. Science*, 1989, Vol. 24, N 6, pp. 944-947.
255. Dreschel T.W., Brown C.S., Piastuch W.C., Hinkle C.R., Knott W.M. Porous tube nutrient delivery system development: A device for nutrient delivery in microgravity. *Adv. Space Res.*, 1994, Vol. 14., No. 11, pp. 47-51,
256. Drysdale A., Thomas M., Fresa M., Wheeler R. OCAM-A CELSS modeling tool: description and results. 1992. SAE technical paper. 921241.
257. Drysdale A. E. Metrics and Systems Analysis. 1998. SAE Technical Paper. 981746.
258. Drysdale A. Performance Measurements and Bioregenerative Life-Support System Performans: How close are we to achieving cost effectiveness? Presentation F4.5-0015 at 31-st COSPAR Scientific Assembly, 14-21 July, 1996. Birmingham, England.
259. Drysdale A. Life support trade studies involving plants. 2001. SAE technical paper. 2001-01-2362.
260. Drysdale A., Ewert M., Hanford A. Equivalent System Mass Studies of Missions and Concepts. 1999. SAE technical paper. 1999-01-2081.

261. Duffie N. A., Zhou W., Morrow R. C., Bula R. J., Tibbitts T. W., Wranovsky S. R., Macaulay P. D. Control and monitoring of environmental parameters in the Astroculture™ flight experiment. 1995. SAE technical paper. 951627.
262. Dycus A. M., Shultz A. J. A survey of the effects of magnetic environments on seed germination and early growth. *Plant Physiology*. 1964. V. 39, pp. 17-26.
263. Eisenberg J., Maszle C., Pawlowski C., Auslander D. Methodology for optimal plant growth strategies in life-support systems. *Jorn. of Aerospace Engineering*. 1995. No. 6, pp. 139-147.
264. Emmerich J. C., Morrow R. C., Clavette T. J., Sirios L. J., Lee M. C. Plant Research Unit Lighting System Development. 2004. SAE technical paper. 2004-01-2454.
265. Feddes R. A., Kowalik P. J., Zaradny H. Simulation of field water use and crop yield. Wageningen, Halsted Press, The Netherlands. 1978.
266. Fonteno, W. C., Cassel, D. K., and Larson, R. A. Physical property of the container media and their effect on poinsettia growth. 1981. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 106: 736-741.
267. Forth W. P., Loser H. Design and Development of the Life Support Subsystem of a Laboratory Model of the Botany Facility. *Proceedings, 17 International Conference on Environmental Systems*. Seattle, WA. 1987. SAE pp. 87-1519.
268. Frantz J., Chun Ch., Joly R., Mitchell C. Intercanopy lighting of cowpea canopies in controlled environments. *Life Support & Biosphere Science*. 1998. Vol. 5, pp. 183-189.
269. Galindo, C., Ming, D. W., Allen, E. R. Characterization of Starting Materials Used in Zeoponic Plant Growth Systems. *Memoirs of the 3rd international conference of the Occurrence, Properties and Utilization of Natural Zeolites*. G. R. Fuentes and J. A. Gonzales (editors). 1993, Vol. 2, pp. 8-13.
270. Galston A. W. Photosynthesis as a basis for life support on Earth and in space. *Bioscience*. 1992. No. 42, pp. 490-493.
271. Garvin M., Kingdon J. Exobiology and Botany facilities for EURECA. *Proceedings of the Third European Symposium on Life Sciences Research in Space*. ESA-271, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp. 27-30. 1987.
272. Geiger D. General lighting requirements for photosynthesis. *Proceed. Of International Lighting in Controlled Environments Workshop*, Wisconsin, USA, March 27-30 1994, pp. 3-18. 1994.
273. Gitelson J. I., Bartsev S. I., Mezhevikin V. V., Okhonin V. A. An alternative approach to solar system exploration providing safety of human mission to Mars. *Adv. Space Res.* 2003. V. 31, No. 1, pp. 17-24.
274. Goins G., Levine H., Mackowiak Ch., Wheeler R., Carr J., Ming W. Comparison Studies of Candidate Nutrient Delivery Systems for Plant Cultivation in Space. 1997. SAE technical paper. 972304.

275. Goins G., Yorio N., Sanwo-Lewandowski M., Brown C. Life cycle experiments with *Arabidopsis* grown under red light emitting diodes (LEDs). *Life Support & Biosphere Science*. 1998. Vol. 5, pp. 143-149.
276. Goins G., Yorio N. Spinach Growth and development under innovative narrow - and broad spectrum lighting sources. 2000, SAE technical paper. 2000-01.
277. Goins G., Ruffe L., Cranston N., Yorio N., Wheeler R., Sager J. Salad crop production under different wavelengths of red light-emitting diodes (LEDs). 2001, SAE technical paper. 2001-01-2422.
278. Goins G.D. Growth, stomatal conductance, and leaf surface temperature of Swiss chard grown under different artificial lighting technologies. 2002, AE technical paper. 2002-01-2338.
279. Gorgolewski S. Generation and control of the natural atmospheric electrical environment in CELSS. *Proceed. of 31st Scientific Assembly of COSPAR*, 14-21 July, 1996. Paper F4.7-0015.
280. Goto E. Growth of rice plant in the vegetative stage under hypobaric condition. *Proceed. of 32nd Scientific Assembly of COSPAR*, 12-19 July, 1998. Paper F4.6-0016.
281. Grodzinski B., Schmidt J., Watts B., Taylor J., Bates S., Staines H. Regulating plant/insect interactions using CO<sub>2</sub> enrichment in model ecosystems. *Proceed. of 31st Scientific Assembly of COSPAR*, 14-21 July, 1996. Paper F4.3-0003.
282. Grodzinski B., Woodrow L., Leonardos E., Dixon M., Tsujita M. Plant responses to short- and long-term exposures to high carbon dioxide levels in closed environments. *Adv. Space Res.* 1996. Vol. 18, No. 4/5, pp. 203-211.
283. Hashimoto T. Requirements of blue, UV-A, and UV-B light for normal growth of higher plants, as assessed by action spectra for growth and related phenomena. *Proceed. Of International Lighting in Controlled Environments Workshop*, Wisconsin, USA, March 27-30 1994, pp. 143-157.
284. Heathcote D., Brown C.S., Goins G., Kliss M., Levine H., Lomax P., Porter R., Wheeler R. The Plant Research Unit: long-term plant growth support for space station. *Proceed. Sixth European Symposium on Life Sciences in Space*, Trondheim, Norway, 16-20 June 1996. ESA SP-390, pp. 43-48. 1996.
285. Hejnowicz Z. Gravitic responses in herbs and trees: a major role for the redistribution of tissue and growth stresses. *Planta*. 1997. V. 203. P. S136-S146.
286. Henninger D.L. Advanced Life Support Program Plan. Life Science Division, Office of Life and Microgravity Sciences and Applications, NASA, Washington. 1996.
287. Heyenga G. The application of passive water and nutrient support systems in space flight plant cultivation. *Proceed. of 31st Scientific Assembly of COSPAR*, 14-21 July, 1996. Paper F4.1-0005.

288. Heyenga G. The utilization of passive water and nutrient support systems in space flight plant cultivation and research. Proceedings of Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems. Noordwijk, The Netherlands. ESA SP-400, 1997. Pp. 867-871.
289. Hicklenton P., Heins R. Temperature. In: Plant Growth Chamber Handbook. Iowa State Univ., USA, 1997. Pp. 31-41.
290. Hoehn A., Chemberlain D., Clawson J., Forsyth S., Hanna D., Horner M., Scovazzo P., Sterret K., Stodieck L., Todd P., Heyenga A., Kliss M. On-orbit and ground performance of the PGBA plant growth facility. 1997. SAE Technical Paper 972366.
291. Hoehn A., Scovazzo P., Stodieck L., Clawson J., Kalinowski W., Rakow A., Simmons D., Heyenga A., Kliss M. Microgravity Root Zone Hydration Systems. 2000. SAE Technical Paper 00ICES-374.
292. Hoehn A., Scovazzo P. Design, testing and operation of porous media for dehumidification and nutrient delivery in microgravity plant growth systems. 2003. SAE Technical Paper 2003-01-2614.
293. Hoenecke M. E., Bula R. J., Tibbitts T. W. Importance of «Blue» Photone Levels for Lettuce Seedlings Grown under Red-light-emitting Diodes. Hort Science, Vol. 27 (5), 1992, pp. 427-430.
294. Holmes S., Micheels K., Lewis R. Site planning and design for first expeditionary Lunar and Mars missions. 2004. SAE technical paper. 2004-01-2531.
295. Horner M., Hoehn A., Scovazzo P., Ashrat H., Hanna D. Optimizing and integrating thermal control systems for space life science hardware. 1997. SAE Technical paper series, paper 972543.
296. Hoson T., Kamisaka S., Masuda Yo. et al. Evaluation of three-dimensional clinostat as a simulator of Weightlessness. Planta. 1997. V. 203. P. S187-S197.
297. Hunter J., Olabi A., Spies R., Rovers A., Levitsky D. Diet Design and food processing for bioregenerative life support systems. 1998. SAE Technical Paper 982365.
298. Ivanova T., Kostov P. Prospects for the use of the higher plants in space flight-Experiment «Substrate». U IAF/IAA-86-374, 37-th congress of the IAF. Innsbruck, Austria, October, 4-11, 1986.
299. Ivanova T. N., Sapunova S. M., Dandolov I. V., Kostov P. T., Berkovich Yu. A., Mashinskiy A. L. Test results on the operation possibility of the SVET greenhouse systems. Current trends in cosmic Biology and Medicine, Proceeding of the XXII International Symposium on cosmic biology and medicine within the INTERCOSMOS, Koshice, CSFR, 1990, p. 281-286.
300. Ivanova T. «Svet» greenhouse project. Proceedings of the 2-nd microsposium «Svet-90» on biotechnology and life support systems of the space biology working group, October 5-11, 1990. Varna, Bulgaria, 1991.



301. Ivanova T.N., Berkovich Yu. A., Mashinskiy A.L., Meleshko G.I. The first «space» vegetables have been grown in the «Svet» greenhouse by means of controlled ecological life support system — CELSS. *Microgravity Q.*, 1992, V. 2. Pp. 109-114.
302. Ivanova T.N., Berkovich Yu. A., Mashinskiy A.L., Meleshko G.I. The first «space» vegetables have been grown in the «Svet» greenhouse using controlled environmental condition. *Acta Astronautica*, 1993, V. 29, No. 8, pp. 639-644.
303. Iverson J. T., Crabb t. M., Morrow R. C., Lee M. C. Biomass production system hardware performance. 2003. SAE technical paper. 2003-01-2484.
304. Iverson J. T., Crabb t. M., Lee M. C., Butrymowicz B. Design of temperature and humidity control systems for microgravity. 2004. SAE technical paper. 2004-01-2457.
305. Iwabuchi K., Goto E., Takakura T. Germination and growth of Spinach under hypobaric conditions. *Environ. Cont. in Biol.* 1996, No. 34, pp. 169-178.
306. Iwabuchi K., Kurata K. Short-term and long-term effects of low total pressure on gas exchange rates of spinach. *Proceed. of 32nd Scientific Assembly of COSPAR*, 12-19 July, 1998. Paper F4.6-0009.
307. Jagow R. B., Thomas B.S.(Eds.) Study of life support systems for space missions exceeding one year in duration. The closed Life Support System Ames Research Center. Moffert Field, California. April 14-15, 1996. (NASA, 1967).
308. Johnson C., Langhans R., Albright L. et al. Spinach: Nitrate Analysis of an Advanced Life Support (ALS) Crop Cultured under ALS Candidate Artificial Light Sources. 1999. SAE technical paper. 1999-01-2107.
309. Johnsson A. Circumnutations: results from recent experiments on Earth and in space. *Planta*. 1997. V. 203. P. S147-S158.
310. Jones H. W. The cost and equivalentsystem mass of space crew time. 2001. SAE technical paper. 2001-01-2359.
311. Jones, S. B., and Or, D. Design of Porous Media for Optimal Gas and Liquid Fluxes to Plant Roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:563-573. 1998.
312. Jones S.B., Or D. A capillary-driven root module for plant growth in microgravity. *Proceed. of 31st Scientific Assembly of COSPAR*, 14-21 July, 1996. Paper F093.
313. Jones S.B., Or D. Process-based selection of particulated growth media for optimal liquid and gaseous fluxes to plant roots in microgravity. *Proceed. of 31st Scientific Assembly of COSPAR*, 14-21 July, 1996. Paper F4.7-0014.
314. Jones S., Or D. Microgravity effects on water flow and distribution in unsaturated porous media: Analyses of flight experiments. *Water Resources Research*. 1999. Vol. 2 No. 7, pp. 221-235.

315. Kitava Y., Shibuya T., Kozai T., Kubota C. Effects of light intensity and air velocity on air temperature, water vapor pressure and CO<sub>2</sub> concentration inside a plant canopy under an artificial lighting condition. *Life Support & Biosphere Science*. 1998. Vol. 5, pp. 199-203.
316. Klassen S., Campbell F., Bugbee B. Effects of low ethylene on USU-Apogee and Super-Dwarf Wheat. 1999. SAE technical paper. 1999-01-2025.
317. Klintworth R., Warrelmann J., Walter S. Development of Biological Life Support Systems. Proceedings. 42-nd Congress of the IAF, October 5-11. IAF/IAA-91-574, p. 6. 1991.
318. Klintworth R. BIOMAUS System. Final Report. MBB Deutsche Aerospace Bremen, Germany. p.19, 1992.
319. Kliss M., Heyenga A., Hoehn A., Stodiek L. Recent advances in technologies required for a «salad machine». Proceed. of 32-nd Scientific Assembly of COSPAR, 12-19 July 1998, Nagoya, Japan. Paper F4.4-0003.
320. Knight S., Mitchell C. Effects of CO<sub>2</sub> and photosynthetic photon flux on yield, gas exchange and growth rate of *Lactuca sativa* L. «Waldmann» s Green». *Jorn. Exp. Bot.* Vol. 39, pp. 317-328. 1983.
321. Koontz H. V., Prince R. P., Berry W. L. A Prous Stainless Steel membrane system for extraterrestrial crop production. *Hort. Science*. 1990. Vol. 25. N 6, p. 707.
322. Krikorian A., Levine H. Development and Growth in Space. *Plant Physiology. A Treatise*. Vol. X, pp. 491-555. 1991.
323. Krivobok N. M., Berkovich Yu. A., Krivobok S. M., Smolyanina S. O. Effects of module design on growth and development of plants under the conditions of lowered water potentials in the root zone. *Gravitational and Space Biology Bulletin*. Vol. 11, No. 1, p. 55. 1997.
324. Levine H., Kann R., Krikorian A. Plant development in space: observations on root formation and growth. Proceedings, 4-th European Symposium Life Science Research in Space, Trieste, Italy. ESA-SP-307, 1990. pp. 503-508.
325. Levinskikh M. A., Sychev V. N., Podolsky I. G., Derendjaeva T. A., Salisbury F. B., Campbell W. Peculiarities of super-dwarf wheat growth and development in greenhouse «Svet» in ground and space experiments. Second International Aerospace Congress. Abstracts. Moscow, Russia. 1997. P. 101.
326. Levri J. A., Vaccary D. A., Drysdale A. E. Theory and application of the equivalent system mass metric. 2000. SAE technical paper. 2000-01-2395.
327. Lork W. Experiments and Appropriate Facilities for Plant Physiology Research in Space. *Acta Astronautica*, V. 17, No. 2, 1988. pp. 271-275.

328. Madsen R. Effect of CO<sub>2</sub> concentration on growth and fruit production of tomato plants. *Acta Agricul. Scand.* 1974, No. 24, pp.242-246.
329. Mashinsky A.L., Ivanova I.E., Derendyaeva T.A., Nechitailo G.S., Salisbury F. «From seed to seed» experiment with wheat plants under space-flight conditions. *Adv. Space Res.* Vol. 14, No. 11, 1994, pp.13-19.
330. Mashinsky A.L., Oreshkin V.I., Nechitailo G.S. Enhancement of efficiency in the use of light for cultivation of plants in controlled ecological systems. *Proceed. of International Lighting in Controlled Environments Workshop, Wiskonsin, USA, March 27-30 1994*, pp. 221-223.
331. Mattoo A. K., Suttle J. C. *The Plant Hormone Ethylene*. CRC Press, Boca Raton, USA. 1991.
332. Maxwell S., Drysdale A. E. Assessment of waste processing technologies for 3 missions. 2001. SAE technical paper. 2001-01-2365.
333. McLennan D., Turner B., Dolan J., Ury M., Gustafson P. Efficient, full-spectrum, long-lived, non-toxic microwave lamp for plant growth. *Proceed. of International Lighting in Controlled Environments Workshop, Wiskonsin, USA, March 27-30 1994*, pp. 243-254. 1994.
334. Merkys A. Plant Growth under Microgravity Conditions: Experiments and Problems. In: *Proceedings of 4-th European Symposium Life Science Research in Space*. Trieste, Italy, ESA- SP-307, 1990. Pp. 503-508.
335. Milks, R. R., Fonteno, W. C., Larsen, R. A. Hydrology of Horticultural Substrates: II. Predicting Physical Properties of Media in Containers. *J. Amer. Hort. Sci.* 1989. 114 (1): 53-56.
336. Millington R.J., Quirk J.P. GAS diffusion in porous media. *Science*. Washington, DC. 130, 1959, pp. 100-102.
337. Millington R.J., Quirk J.P. Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* 1961. Vol. 57. P. 1200-1207.
338. Monje O., Bugbee B. Adaptation to high CO<sub>2</sub> concentration in an optimal environment: radiation capture, canopy quantum yield and carbon use efficiency. *Plant, Cell and Environment*. 1998 No. 21, pp. 315-324.
339. Monsi M., Saeki T. Uber den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung fur die stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*. 1953. No. 14, pp. 22-52.
340. Morrow R. C., Iverson J. T., Richter R. C., Stadler J. J. Biomass Production System (BPS) technology validation test results. 2004. SAE technical paper. 2004-01-2460.
341. Morrow C., Wheeler R. Plant Physiological Disorders. In: *Plant Growth Chamber Handbook*. Iowa State University, ISSN:0361-199X, 1997. P. 133-141.

342. Morrow R. C., Bula R. J., Tibbitts T. W., Dinauer W. R. The Astroculture™ experiment series, validating technologies for growing plants in space. *Adv. Space Res.* 1994. Vol. 14, pp. 29-37.
343. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 1976. No. 12. P. 513-522.
344. Nakamura T., Case J., Jack D., Cuello J. Optical Waveguide Solar Plant Lighting System for Life Support in Space. 1999. SAE technical paper. 1999-01-2105.
345. Nechitailo G. S., Mashinsky A. L. Space biology. Studies at orbital stations. «Mir» Publishers. Moscow, 1993. 503 p.
346. Nelson M., Burgess T., Alling A., Alvares-Romo N., Dempster W., Walford R., Allen J. Using a Closed Ecological System to Study Earth's Biosphere. *Bioscience.* Vol. 43, No. 4, 1993, pp. 225-236.
347. Nelson M., Dempster W., Alvares-Romo N., MacCallum T. Atmosphere dynamics and bioregenerative technologies in a soil-based ecological life support system: Initial results from Biosphere 2. *Adv. Space Res.* Vol. 14 (11), 1994. pp. 417-426.
348. Nitta K., Ohya H. Lunar base extension program and closed life support system. Technical Paper# IAA-T-50 of 8th IAA Man in Space Symposium. Tashkent, USSR, Sept. 29-Oct. 4, 1989. Pp.1-9.
349. Nitta K. The miny-earth and the results of pre-habitation experiments.
350. Presentation F.4.1-0003-04 in 35-th Scientific Assembly of COSPAR. 18-25 July 2004. Paris, France.
351. Nitta K. Design philosophy of CEEF. Presentation F.4.3-0027 in 31-st Scientific Assembly of COSPAR. 14-21 July 1996. Birmingham, England.
352. Nitta K. An overview of Japanese CELSS research activities in controlled ecological life support systems. *Adv. Space Res.* Vol.7 (4), pp. 95-104. 1987.
353. Nitta K., Otsubo K., Ashida A. Integration test project of CEEF. Presentation F.4.5-0008 in 32-nd Scientific Assembly of COSPAR. 12-19 July 1998. Nagoya, Japan.
354. Olson R. L., Oleson M. W., Slavin T. J. CELSS for Advanced Manned Missions. *Hort Science*, 1987. V. 23 (2), pp. 293-299.
355. Ono E., Cuello J. L., Jordan K. A. Characterizations of high-intensity red and blue light-emitting diodes (LEDs) as a light source for plant growth. 1998, *Life Support & Biosphere Science.* Vol.5, pp. 403-413.
356. Oppenheimer K. R. A proxy approach to multiattribute decision making. *Management Science.* 1978. Vol. 24, pp.675-689.
357. Perbal G., Driss-Ecole D., Tewinkel M., Volkmann D. Statocyte polarity and gravisen-sitivity in seedling roots grown in microgravity. *Planta.* 1997. V. 203. Pp. S57-S62.

358. Peryshkina N.G., Lukashevich L.I., Khoroshko I.F., Batmanova H.D., Jakovleva N.A. Estimation of productive potential of the ionexchange materials as feeding medium for plants. News from Belarussian Academy of Sciences, Biological series. 1990, N 6, pp. 78-83.
359. Peterson R. A., Anderson M. A., Hill C.G. Development of TiO<sub>2</sub> membranes for gas phase nanofiltration. Journ. of Membrane Science. 1994. #94, pp.103-109.
360. Piaśtuch W., Dreschel T., Bledsoe J., Brown C. A small, closed, computer controlled chamber for study of atmospheric and water availability effects on plan growth and metabolism. 1995. SAE technical paper # 957656.
361. Podolskiy I.G., Mashinskiy A.L., Berkovich Yu. A., Ivanova T.N. Gas-liquid supply of the root zone of the «Svet» greenhouse vegetative pot in space flight. Proceedings of the 2-nd micro-symposium SVET-90 on Biotechnology and life supports of the space biology working group, Bulgarian Academy of sciences. 1991, c. 47-55.
362. Podolsky I., Mashinsky A. Peculiarities of moisture transfer in capillary-porous soil substrates during space flight. Adv. Space Res. Vol.14, No.11, pp.39-46, 1994.
363. Porterfield D., Barta D., Ming D., Morrow R., Musgrave M. Astroculture root metabolism and cytochemical analysis. Presentation F4.5-0003 at 32nd Scientific Assembly COSPAR, 12-19 July 1998, Nagoya, Japan.
364. Porterfield D., Dreschel T., Musgrave M. A ground- based Comparison of Nutrient delivery Technologies Originally Developed for Growing Plants in Spaceflight Environment. Hort Technology, 2000. Vol. 10, No.1, pp.179-185.
365. Powell F.T., Sudar M., Timm M., Yošt B. Atmosphere Control for Plant Growth Flight Experiments. 19-Th Inter. Conference on Environmental Systems, Seattle, WA. 1989. SAE technical paper #891587.
366. Prikupets L., Tikhomirov A. Optimization of lamp spectrum for vegetable growth. Proceed. of International Lighting in Controlled Environments Workshop, Wiskonsin, USA, March 27-30 1994, pp. 31-38. 1994.
367. Prince R.P., Knott W.M., Sager J.C. Hilding S.E. Design and performance of the KSC Biomass Production Chamber. 1987. SAE Technical Paper # 871437.
368. Rosen E., Chen R., Masson P. Root gravitropism: a complex response to a simple stimulus? Trends in Plant Science. Vol.4, № 10, 1999, p.407-412
369. Sager J., Smith W., Edwards J., Cyr K. Use of spectral data to determine photosynthetic efficiency and phytochrom photoequilibria. Transaction of the ASAE. 1988. Vol.31, No.5, pp.1882-1889.
370. Sager J., Mc Farlane C. Radiation. In: Plant Growth Chamber Handbook. Iowa State Univ., USA, 1997, pp.1-29.

371. Sager J., McFarlane C. Radiation. In: Plant Growth Chamber Handbook. Iowa State Univ., USA, 1997, pp. 1-29.
372. Salisbury F., Bugbee B. Plant productivity in controlled environments. HortScience, Vol.23 (2), pp. 293-299. 1988.
373. Salisbury F.B. Controlled environment life support systems (CELSS): A prerequisite for long term space studies. Fundamentals of space biology. Japan Sci. Soc. Press. Tokyo. 1990. Pp. 171-183. 311.
374. Salisbury F.B. Lunar agriculture and growth of superdwarf wheat in microgravity. Proceedings of X reunion Nacional de la S.E. F. V.III Congreso Hispano-Portugues de Fisiologia Vegetal.1995. Pp.11-17.
375. Salisbury F.B., Gitelson J.I., Lisovsky G.M. Bios-3: Siberian experiments in bioregenerative life support.1997. BioScience, V.47, No.9, pp.575-585.
376. Salisbury F.B., Dempster W.F., Allen J.P., Alling A., Bubenheim D. et al. Light, Plants and Power for life support on Mars. Life Support & Biosphere Science. 2002, Vol. 8, pp. 161-172.
377. Samsonov N.M., Kurmazenko E.A., Farafonov N.S., Menkin E.V. An efficiency of technologies and a strategy for synthesis of integrated life support system structure. 2000. SAE technical paper #2000-01-2396.
378. Scarascia-Mugnozza G., Schettini E. Preliminary Indication on the Technological Systems for an Italian Space Greenhouse. 2002. SAE Technical Paper # 2002-01-24-86.
379. Scherer G.F.I.: General discussion on graviperception. Planta, vol. 203, 1997, p.107-111.
380. Seibert G. Life sciences in framework of the microgravity programme and future flight opportunities. Proceedings of the Third European Symposium on Life Sciences Research in Space. ESA SP-271, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp. 13-18. 1987.
381. Silverstone S., Nelson M. Food production and nutrition in Biosphere 2: results from the first mission september 1991 to september 1993. Adv. Space Res. Vol.18, No.4/5, pp.49-61. 1996.
382. Sinyak Yu. E., Grigoriev A.I., Gaidadimov V.B., Gurieva T.S., Levinskih M.A. Deuterium free water (1H2O) in complex life support systems of long-term space missions. IAF/IAA-99-G.4.03. Proceed. of 50th International Astronautical Congress, 4-8 October 1999, Amsterdam, The Netherlands.
383. Sinyak Y., Grigoriev A., Gaydadimov V., Gurieva T., Levinskih M., Pokrovskii B. Deuterium-free water (1H2O) in complex life-support systems of long-term space missions. Acta Astronautica. 2003, Vol. 52, pp. 575-580.

384. Soldatov V.S., Peryshkina N.G., Lukashevich L.I., Khoroshko R.P. The artificial substrates for plants on the basis of fibrous ionexchange materials. News from Belarussian Academy of Sciences, Chemical series. 1985, N 6, pp. 85-90.
385. Spomer A., Tibbitts T. Humidity. In: Plant Growth Chamber Handbook. Iowa State Univ., USA, 1997, pp. 43-79.
386. Stadler J.J., Brideau L.D., Emmerich J.C., Varma N.N. Integrating reliability principles in the design of the Plant Research Unit (PRU). 2004. SAE technical paper N 2004-01-2393.
387. Stasiak M., Cote R., Dixon M., Grodzinski B. Increasing plant productivity in closed environments with inner canopy illumination. Life Support & Biosphere Science. 1998. Vol. 5, pp.175-181.
388. Stasiak M., Cote R., Grodzinski B., Dixon M. Light Piping To The Inner Plant Canopy Enhances Plant Growth And Increases O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O And Ethylene Gas Exchange Rates. 1999. SAE technical paper # 1999-01-2103.
389. Steinberg S.L., Henninger D.L. Response of the water status of soybean to changes in soil water potentials controlled by the water pressure in microporous tubes. Plant, Soil and Environment. 1997. No. 20, pp.1506-1516.
390. Steinberg S.L., Ming D., Henderson K., Carrier Ch., Gruener J., Barta D., Henninger D.L. Wheat response to differences in water and nutritional status between zeoponic and hydroponic growth systems. Agronomy Journal. 2000 No.6, pp.198-205.
391. Steiner A. A. The selective capacity of plants for ions and its importance for composition and treatment of nutrient solution. Proceedings of Intern. congress on soilless culture. Wageningen, 1980. pp. 83-95.
392. Stern A. C. Air pollution. V.1. N-Y-London. 1988. 594 p.
393. Sychev V.N., Levinskikh M. A., Shepelev Ye. Ya. The biological component of the life support system for a Martian expedition. 2003. Adv. Space Res. Vol.31, No.7, pp. 16-93-1698.
394. Takai Yu., Miyatake K., Viyoshi K., Takashima Ya. Renovation of Salad Mashine for profitable agricultural production. 2004. SAE technical paper 2004-01-2432.
395. Tako Y., Arai R., Nitta K. Analysis of photothynthesis and biomass allocation for simulation of edible and inedible biomass production and gas exchange of main crops within CEEF. 2002. SAE technical paper # 2002-01-2484.
396. Takashima Ya. A conceptual designs for programmable advanced Life Support System with flexible food production system. 1999. SAE technical paper N 1999-01-1987.
397. Tasaka, M., Kato, T., Fukaki, H. The endodermis and shoot gravitropism. Trends in Plant Science, 1999, v. 4, № 3, pp.103-107.

398. Teixeira A. A., Welt B. A., Singh R. P. ALS-Integrated food/fiber production and packaging system for long-term space mission to Mars. 2004. SAE technical paper # 2004-01-2522.
399. Tennessen D., Ciolkosz D. Towards efficient conversion of electricity into edible biomass in crop production systems: a transgenic approach. *Life Support & Biosphere Science*. 1998. Vol. 5, pp. 217-223.
400. Thimijan R. W., Heins R. D. Photometric, radiometric and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. *Hort Science*. 1983. Vol. 18 (6), pp. 818-822.
401. Thornly I. H. M. *Mathematical Models in Plant Physiology*. Academic press, L-N-Y, 1976.
402. Tikhomirov A. Spectral composition of light and growing of plants in controlled environments. *Proceed. of International Lighting in Controlled Environments Workshop, Wisconsin, USA, March 27-30 1994*, pp. 25-29. 1994.
403. Tobias C. A., Todd P. W. (Eds.) *Space radiation biology and related topics*. N. Y. 1974, P.329.
404. Tri T. O. Bioregenerative Planetary Life Support System Test Complex (BIO-Plex): test mission objectives and facility development. 1999. SAE technical paper 1999-01-2186.
405. Tri T. O., Henninger D. L. Progress on development of the Advanced Life Support Human-Rated Test Facility. 1995. SAE technical paper 951691.
406. Turner M., Zhou W. Development of a high output fluorescent light module for the commercial plant biotechnology facility. 2000. SAE technical paper # 2002-01-2423.
407. Van Genuchten M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Journ.* 1980. Vol. 44. P. 892-898; 1995. Vol. 59. P. 292-299.
408. Volk T., Rummel J. D. Mass balances for a biological life support system simulation model. *Controlled ecological life support system*. 1987. NASA Conf. Publ. 2480. NASA Ames Research Center. Moffert Field, pp. 139-146.
409. Walford R., Harris S., Gunion M. The calorically restricted low-fat nutrient-dense diet in Biosphere 2 significantly lowers blood glucose, total Leukocyte count, cholesterol and blood pressure in humans. *Proceedings National Academy of Science*, 1992, 89, pp.11533-11537.
410. Wells B., Hoehn A., Levine H. Collaborative Development of a Space Flight Experiment Comparing Two Plant Nutrient Delivery Systems. 2000. SAE Technical Paper 00ICES-372.
411. Westgate, M. E., and Boyer, J. S. Osmotic adjustment and the inhibition of leaf, root, stem and silk growth at low water potentials in maize. *Planta* 164:540-549. 1985.



412. Wheeler R., Mackowiak C., Sager J. Proximate composition of seed and biomass from soybean plants grown at different carbon dioxide concentrations. NASA Techn. Memorandum № 103496. 1990, 25 p.
413. Wheeler R., Corey K., Sager J., Knott W. Gas exchange characteristics of wheat stands grown in a closed, controlled environment. *Crop Science*. 1993. Vol. 33, pp. 161-168.
414. Wheeler R., Mackowiak C., Sager J., Knott W. Growth of soybean and potato at high CO<sub>2</sub> partial pressure. *Adv. Space Res.* 1994. Vol., No.11, pp.251-255.
415. Wheeler R., Mackowiak C., Sager J., Yorio, Knott W., Berry W. Growth and Gas Exchange by Lettuce Stands in a Closed, Controlled Environment. *Journ. of the ASHS*, 1994. Vol. 119 (3), pp. 610-615.
416. Wheeler R. M., Mackowiak C. L., Stutte G. W., Sager J. C., Yorio N. C., Ruffe L. M., Fortson R. E., Dreschel T. W., Knott W. M., Corey K. A. NASA's biomass production chamber: a testbed for bioregenerative life support studies. *Adv. Space Res.* Vol. 18, No. 4/5, Pp. 215-224. 1996.
417. Wheeler R., Peterson B., Sager J., Knott B. Ethylene production by plants in a closed environment. *Adv. Space Res.* 1996. V.18, No. 4/5, pp. 193-196.
418. Wheeler R. M., Strayer R. F. Use of bioregenerative technologies for Advanced Life Support: some considerations for BIO-Plex and related testbeds. NASA Technical Memorandum 113229. 1997. P.28.
419. Wiedenroth, E. M., and B. Erdmann, Morphological Changes in Wheat Seedlings (*Triticum Aestivum* L.) Following Root Anaerobiosis and Partial Pruning the Root System, *Ann. Bot.*, 1985, Vol. 56, pp. 307-316.
420. Wieland P. O. Living together in space: the design and operation of the life support systems on International space station. NASA/TM-98-206956/Vol. 2. 1998, pp. 31-32.
421. Wright, B. D., Bausch, W. C., Knott, W. M. A Hydroponic system for microgravity plant experiments. *Trans. of ASAE* Vol. 31, N 2, 1988, pp. 440-446.
422. Yandell B., Najar A., Wheeler R., Tibbitts T. Modeling the effects of light, carbon dioxide, and temperature on the growth of potato. *Crop Science*. 1988. Vol. 28, No.5, pp. 811-818.
423. Yendler B. S., Webbon B. Capillary movement of liquid in granular beds. 1993. SAE Technical Paper. No. 932164.
424. Yendler B. S., Webbon B., Podolski I., Bula R. Capillary movement of liquid in granular beds in microgravity. *Adv. Space Res.* 1996. Vol. 18, No. 4/5, pp. 233-237.
425. Yorio N., Wheeler R., Goins G., Sanwo-Lewandowski M et al. Blue light requirements for crop plants used in bioregenerative life support systems. *Life Support & Biosphere Science*. 1998. Vol. 5, pp. 119-128.

426. Zhilenkova O. G., Smolyanina S. O., Berkovich, Yu. A., Krivobok N. M. Leaf mustard Brassica Junceaе (l) ontogenetic alteration as possible mechanism of adaptation to root zone water deficit. Proceedings of All Russian Scientific Conference «Plant and Soil», p. 24-25. St. Peterburg, Russia. 6-10 December, 1999.
427. Zhou W., Turner M. Development of the commercial plant biotechnology facility for the International Space Station. 2000. SAE Technical Paper 2000-01-2473.
428. Zhou W., Durst S. J., DeMars M., Stancovich B., Link B. M. et al. Performance of the Advanced ASTROCULTURE™ plant growth unit during ISS-6A/7A Mission. 2002. SAE Technical Paper 02ICES-267.
429. Zhou W., Durst S. J., Meyers R., Tellez G., DeMars M., Sandstrom P. Capabilities of the Advanced ASTROCULTURE™ plant growth unit to support plant research conducted on the International Space Station. Presentation F4.1-0010-04 at 35th COSPAR Scientific Assembly, 18-25 July 2004, Paris, France.

## **СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ АВТОРСКИХ СВИДЕТЕЛЬСТВ И ПАТЕНТОВ**

1. Беркович Ю. А., Корбут В. Л., Павловский В. И. Устройство для выращивания растений. А. с. СССР № 914004 от 26.03.79.
2. Беркович Ю. А., Корбут В. Л., Павловский В. И. Устройство для выращивания растений. А. с. СССР № 818563 от 11.11.79.
3. Беркович Ю. А., Корбут В. Л., Павловский В. И., Складнев В. Г. Устройство для выращивания растений. А. с. СССР № 1047449 от 11.05.82.
4. Беркович Ю. А., Корбут В. Л., Павловский В. И. Устройство для конвейерного выращивания растений. А. с. СССР № 1012846 от 21.12.82.
5. Беркович Ю. А., Гришаенков Б. Г., Коганов М. М., Ксенжек О. С., Петрова С. П. Способ выращивания высших растений в космических оранжереях. А. с. СССР № 1236622 от 03.08.83.
6. Беркович Ю. А., Симонов В. М., Павловский В. И., Кривобок Н. М. Вегетационное устройство для растений. А. с. СССР № 1161022 от 16.12.83.
7. Беркович Ю. А., Симонов В. М., Павловский В. И., Кривобок Н. М. Вегетационное устройство для растений. А. с. СССР № 1293865 от 30.01.85.
8. Беркович Ю. А., Соловьёв В. И. Вегетационная камера. А. с. СССР № 1369012 от 29.10.85.

9. Беркович Ю. А., Симонов В. М., Шайдоров Ю. И., Иванова Т. Н., Стругов О. М., Костов П. П., Кынчев Н. *Вегетационный сосуд для растений*. А. с. СССР № 14-24774. 1986 г.
10. Беркович Ю. А., Симонов В. М., Шайдоров Ю. И., Иванова Т. Н., Стругов О. М., Костов П. П., Кынчев Н. *Вегетационный сосуд для растений*. А. с. СССР № 1598926. 1988 г.
11. Беркович Ю. А., Машинский В. Л., Павловский В. И. *Устройство для конвейерного выращивания растений*. Патент РФ № 1748753 от 19.02.90.
12. Беркович Ю. А., Павловский В. И. *Установка для конвейерного выращивания растений и её вариант*. Патент РФ № 2091009 от 27.09.97.
13. Беркович Ю. А., Кривобок Н. М., Синяк Ю. Е. *Способ корневого питания растений в искусственных условиях и устройство для его осуществления*. Патент РФ № 2115302 от 20.07.98.
14. Норкин К. Б., Сулова О. Б., Тиме И. В., Беркович Ю. А., Корбут В. Л. *Система оптимизации факторов среды при выращивании растений*. А. с. СССР № 703064. 1979 г.

© Фирма “Слово”  
123007, Москва, Хорошевское шоссе, д. 76А  
Редактор В.В. Круговых  
Макет Г.Б. Маравин  
Сдано в набор 01.11.2004. Подписано в печать 02.02.2005.  
Формат 60.90/16 Бумага офсетная № 1.  
Гарнитура NewtonС. Печать офсетная. Печ. л. 23  
Заказ 573. Тираж 250 экз.

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в типографии редакционно-издательской группы  
ГУ НИИ общей патологии и патофизиологии РАМН.  
Адрес: 125315, Москва, ул. Балтийская, 8, комн. 344.  
Адрес для писем: 125315, Москва, а/я 9.  
Телефон (095) 151-51-57, 518-14-51.