# НИЦ «Замкнутые экосистемы» Часть I

## Описание БИОС-3

*Глава 2*

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС «БИОС-3»

Для проведения настоящего эксперимента использовался исследовательский комплекс «Биос-3», кратко описанный ранее (Гительзон и др., 1975).

Установка «Биос-3» представляет собой сварной корпус из нержавеющей стали, размерами 14×9×2,5 м и объемом около 315 м$^3$. Корпус разделен герметичными переборками на четыре равных отсека (рис. 1), два из которых заняты фитотронами, один — микроводорослевыми культиваторами, а последний жилой, там располагаются каюты экипажа, бытовое и вспомогательное оборудование. Водорослевый отсек в описываемом эксперименте не использовался и был отключен от системы по всем коммуникациям, поэтому в дальнейшем описываться не будет.

Все отсеки комплекса соединяются друг с другом герметизируемыми дверьми, такие же двери ведут наружу из каждого отсека. Каждая дверь как изнутри, так и снаружи может быть при необходимости открыта одним человеком не более чем за 10 с. Оборудование отсеков системы опишем более подробно.

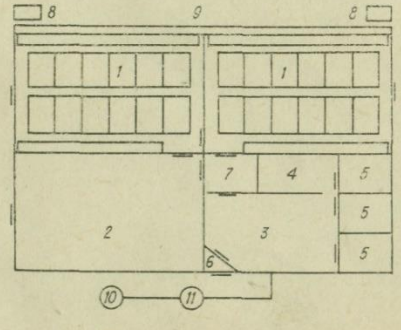


*Рис. 1.* Экспериментальный комплекс «Биос-3» в плане.

*1* — фитотроны; *2* — отсек водорослевых культиваторов; *3* — обитаемый отсек; *4* — кухня-столовая; *5* — каюты; *6* — шлюз-санузел; *7* — тамбур; *8* — насосы системы охлаждения источников света; *9* — коллектор полива теплообменной стены фитотронов; *10* — компрессор наддува; *11* — бактериальный фильтр.



### ФИТОТРОНЫ

В комплекс «Биос-3» входят два одинаковых фитотрона. В каждом из них имеются две системы выращивания растений, а также системы освещения и теплоотвода.

**Основная система выращивания** состоит (рис. 2) из 12 одинаковых поддонов размером 140×100×12 см и устройства распределения питательной среды. Все поддоны и коммуникации изготовлены из нержавеющей стали. Одновременно для культивирования растений в поддонах могут использоваться две питательные среды. Для этого на полу отсека под поддонами расположены (рис. 3) два гидрораспределителя (*1*), соединенные двенадцатью параллельными трубопроводами (*2*). От каждого из этих трубопроводов имеется по одному ответвлению, ведущему в один из поддонов. Любое ответвление с помощью вентилей (*3*) может быть сообщено с левым либо с правым

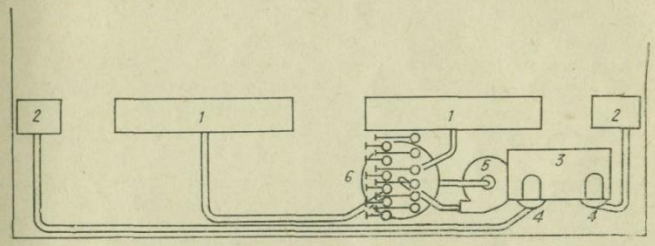


*Рис. 2.* Система выращивания растений в фитотронах «Биос-3» (вертикальный разрез).

*1* — поддоны основной системы; *2* — поддоны дополнительной системы; *3* — емкость питательной среды дополнительной системы; *4* — насосы дополнительной системы; *5* — насос основной системы; *6* — коммуникации питательной среды основной системы.

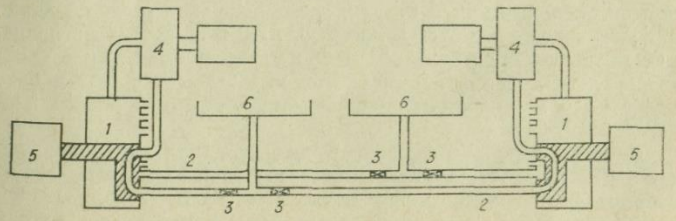


*Рис. 3.* Схема распределения питательной среды по поддонам основной системы выращивания.

*1* — гидрораспределители; *2* — трубопроводы; *3* — запорная арматура; *4* — насосы питательных сред; *5* — импульсный привод вала распределителя; *6* — поддоны.

гидрораспределителем, каждый из них связан со своим центробежным насосом, который забирает питательный раствор из корпуса гидрораспределителя и нагнетает его в один из трубопроводов (*2*). При импульсном вращении вала гидрораспределителя насос поочередно нагнетает раствор во все 12 трубопроводов (*2*). При этом раствор поочередно подается в те из 12 поддонов, вентили которых (3) открыты со стороны распределителя. В случае, если вентиль закрыт, насос работает вхолостую без расхода жидкости. После заполнения любого поддона и переключения гидрораспределителя на следующий трубопровод, раствор предыдущего поддона по его трубопроводу стекает в корпус распределителя и тут же насосом закачивается в следующий поддон. Таким образом, при этой системе емкость питательного раствора отсутствует, а одна и та же его порция — 100—200 л — постоянно перекачивается из поддона в поддон с периодом, равным периоду вращения вала распределителя. Оба гидрораспределителя работают одновременно, но с различной (необходимой по условиям эксперимента) частотой вращения. Любой поддон может быть отключен от полива одним раствором и подключен к другому путем открывания и перекрывания вентилей (*3*).

В случае отказа одного из насосов или гидрораспределителей все поддоны могут быть переключены на исправный агрегат. При остановке вращения гидрораспределителя весь раствор закачивается в один из поддонов (в зависимости от позиции распределителя) и удерживается там до тех пор, пока работает соответствующий насос. При остановке насосов питательный раствор расстекается по поддонам равномерно.

Поддоны системы выращивания могут быть заполнены субстратом, например керамзитом, или оставаться пустыми, когда растения (зерновые) закрепляются в рейках-держателях (рис. 4 и 5), которые располагаются в поддонах с необходимой для эксперимента густотой и высотой от днища.

Кроме основной системы культивирования растений в каждом фитотроне имеется вторая, дополнительная система, включающая 6 поддонов общей площадью 3,6 м$^2$. Растения в поддонах поливаются из бака (*3*) путем периодического включения встроенных в бак насосов. Обмен питательной среды в баке около 100 л и зависит от необходимого уровня заполнения поддонов при поливе.

Система теплоотвода фитотронов — водяная двухконтурная (рис. 6). Теплоотвод осуществляется через металлическую стенку фитотрона, которая поливается извне водопроводной водой, а изнутри с помощью насоса (*1*) и коллектора (*2*) внутренней водой, собирающейся в желобе (*3*) после охлаждения на стене. Охлажденная вода забирается насосом (*4*) и через коллектор (*5*), расположенный под потолком, по периметру фитотрона подается в пространство между стеной и металличе-



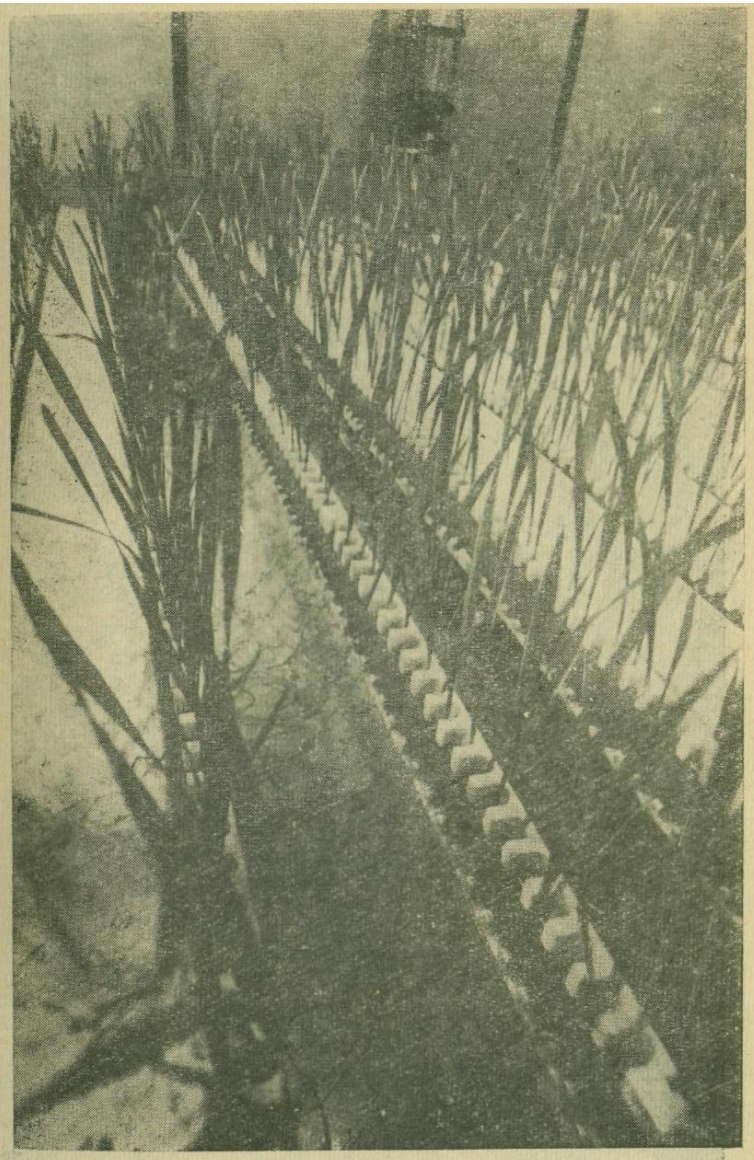

*Рис. 4.* Закрепление растений пшеницы в рейках.

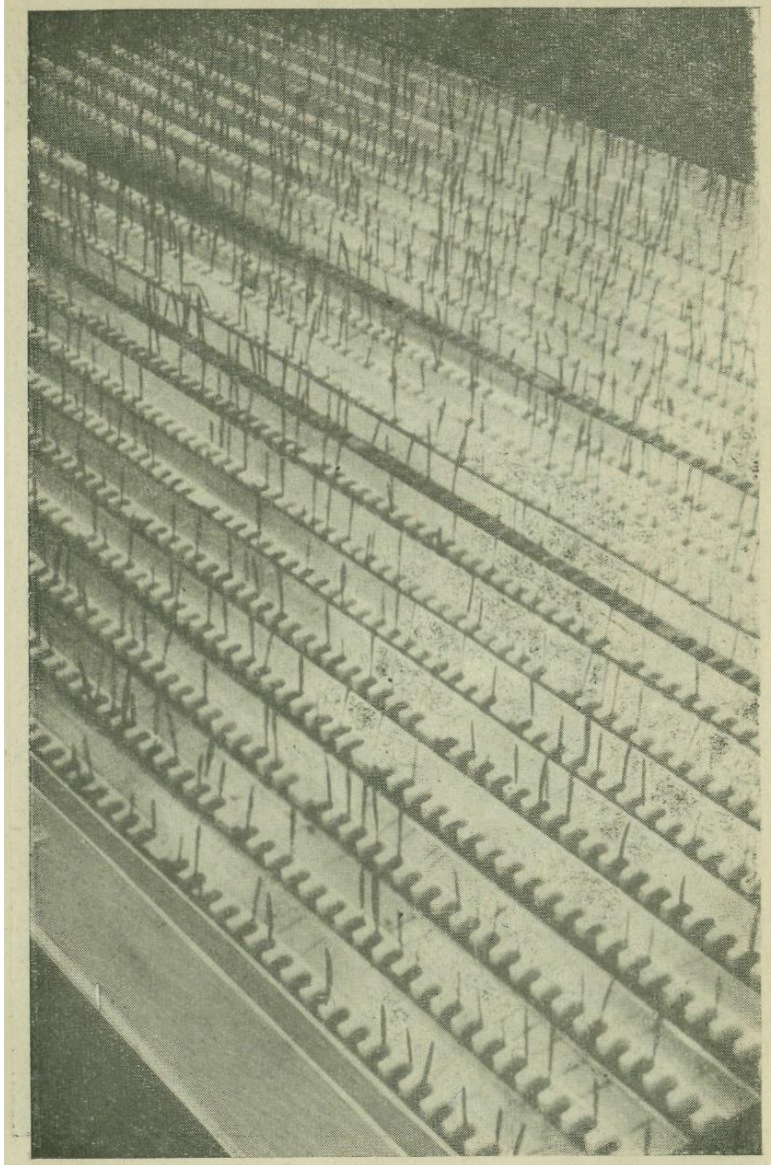

*Рис. 5.* Расположение реек с растениями пшеницы в поддоне.

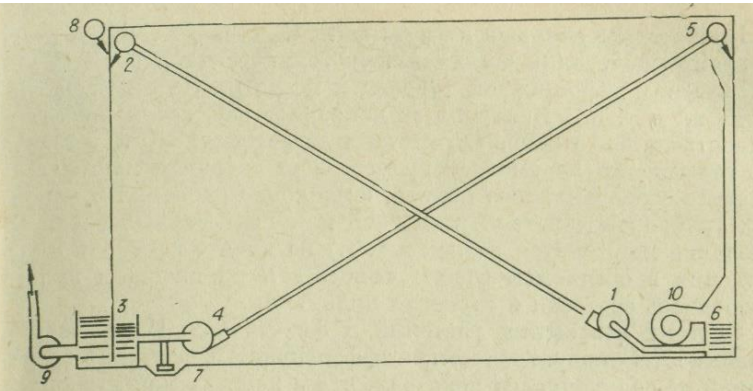


*Рис. 6.* Схема системы теплоотвода фитотрона (вертикальный разрез).

*1* — насос нагретого теплоносителя; *2* — коллектор нагретого теплоносителя; *5* — коллектор холодного теплоносителя; *6* — сборник нагретого теплоносителя; *7* — поплавковый клапан отсоса конденсата; *8* — коллектор водопроводной воды; *9* — насос охлаждения ламп ДКсТВ-6000, *10* — вентилятор.

ским экраном. В то же пространство снизу вентиляторами (*10*) подается для охлаждения воздух фитотрона. Нагревшаяся вода скапливается в другом желобе (*6*), откуда вновь идет на охлаждение, а охлажденный и осушенный воздух поступает в верхнюю часть фитотрона. Снаружи водопроводная вода охлаждает внешнюю стену фитотрона, а затем используется для охлаждения источников света — ламп ДКсТВ-6000. Регулирование температуры атмосферы фитотронов осуществляется путем изменения расхода первичного хладоагента — водопроводной воды.

При выращивании растений в фитотроне транспирационная влага конденсируется в системе охлаждения, поэтому из этой системы постоянно отбиралась вода для пополнения объема питательной среды, которое осуществлялось автоматическими реле и контактными датчиками уровня.

При работе на полу фитотрона неизбежно накапливается конденсат, образующийся в трубопроводах системы охлаждения, и вода из-за подтекания в уплотнениях, сальниках насосов и т. д. Для сбора этой воды на полу фитотрона установлено поплавковое клапанное устройство (*7*), через которое она насосом (*4*) откачивается в систему охлаждения. Для повышения надежности системы охлаждения насосы (*1*, *4*) продублированы. Управление системами фитотронов осуществляется со щита контроля и управления, расположенного в обитаемом отсеке.

Отбор проб питательных сред для анализов, а также введение корректирующих добавок выполняется из обитаемого отсека по системе специально для этой цели проложенных трубопроводов.

## ОБИТАЕМЫЙ ОТСЕК

Обитаемый отсек «Биос-3» имеет площадь 4,5×7 м. В отсеке расположены (рис. 10) три каюты для экипажа. В описываемом эксперименте в одной из кают располагалась установка для сжигания атмосферных примесей и непищевой биомассы растений, а экипаж занимал остальные две каюты. В том же отсеке располагается кухня-столовая, оборудованная электропечью и холодильником. В кухне установлено оборудование для приготовления питьевой воды.

Для санитарно-гигиенических процедур использовался санузел, который одновременно служил и входным шлюзом всего комплекса «Биос-3». В санузле имеется умывальник, душ с электроподогревом воды и ассенизационное устройство. В тамбуре у дверей фитотрона установлена беспылевая молотилка-веялка для обмолота пшеницы и отделения зерна и мельница для получения муки.

В обитаемом отсеке располагаются также рабочий стол, пульт контроля и управления энергопотребителями фитотронов, сушильный шкаф, кондиционер и другое вспомогательное оборудование.

Для передачи внутрь и обратно предметов во время эксперимента обитаемый отсек оборудован тремя шлюзами: в санузле — для передачи ассенизационных сосудов, в рабочем помещении — для передачи оборудования, инструментов и т. д. и в одной каюте экипажа — для медицинских целей.

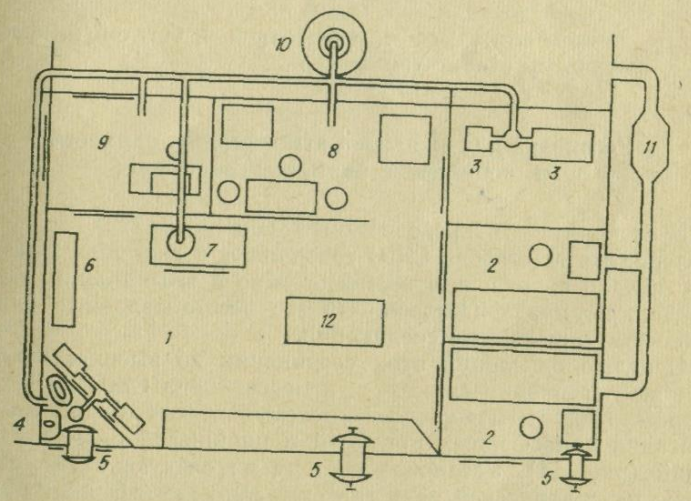


*Рис. 10.* **Обитаемый отсек «Биос-3» в плане.**

*1* — рабочее помещение; *2* — каюты; *3* — каталитическая установка для сжигания атмосферных примесей и непищевой биомассы; *4* — шлюз-санузел; *5* — шлюз для передачи предметов; *6* — пульт контроля и управления фитотронами; *7* — сушильный шкаф; *8* — кухня-столовая; *9* — тамбур; *10* — циркуляционный вентилятор; *11* — теплообменник; *12* — кондиционер (подвешен у потолка).



Во время эксперимента в комплексе «Биос-3» организуется принудительная циркуляция атмосферы между отсеками. Циркуляционный вентилятор отсасывает воздух из трех точек обитаемого отсека: кухни, санузла и тамбура (см. рис. 10). Кроме того, отсос постоянно идет из сушильного шкафа и термокаталитических печей, также расположенных в обитаемом отсеке. Общий поток, отбираемый циркуляционным вентилятором, составлял 0,5—1,5 м$^3$/мин.

Газообмен между фитотронами осуществлялся через открытую между ними дверь за счет работы вентиляторов системы теплоотвода. При работе циркуляционного вентилятора давление в фитотронах поддерживалось на 10—15 мм вод. ст. выше, чем в обитаемом отсеке, и атмосфера фитотронов через теплообменник поступала в каюты экипажа и далее в рабочее помещение отсека.

Накапливающийся в теплообменнике конденсат использовался экипажем для приготовления питьевой и санитарно-бытовой воды.

Для перехода экипажа из обитаемого отсека в фитотроны циркуляционный вентилятор отключался и после выравнивания давления в отсеках переходная дверь разгерметизировалась. Такой порядок перехода необходим для предотвращения массового проникновения атмосферы фитотронов, богатой микрофлорой, в обитаемый отсек через дверь.

# Физико-химическая утилизация органических отходов.

В Институте биофизики СО РАН разработан физико-химический способ утилизации органических отходов в биотехнических системах жизнеобеспечения типа Биос-3 – «мокрое» сжигание. Данная разработка позволяет в течение нескольких часов из отходов жизнедеятельности человека или несъедобной растительной биомассы получить минеральный раствор, который может быть использован, как добавка в минеральном питании звена высших растений системы жизнеобеспечения.

Суть метода заключается в окислении органической массы в водном растворе перекиси водорода под действием переменного тока. Ток в данном случае играет роль активатора реакции: под его действием молекулы перекиси водорода распадаются с образованием свободных радикалов, которые являются главными окислительными агентами. Цепной характер реакций окисления в этом случае дает методу преимущество при масштабировании – большие масштабы ведут к меньшему удельному энергопотреблению.

В испытательных целях был создан реактор «мокрого» сжигания с рабочим объемом 9 л (см. рис.), способный единовременно утилизировать суточную норму плотных и жидких отходов жизнедеятельности трех человек (максимальная численность экипажа Биос-3) в течение 4 ч. Эксперименты показали, что получаемый раствор может быть использован в качестве добавки минерального питания при выращивании культурных растений без негативного влияния на характеристики урожая. Также был разработан способ глубокой каталитической очистки выделяющегося реакторного газа, определены оптимальные параметры (динамика напряжения, форма, частота и сила тока) подаваемого тока, разработан подход перевода в растворимую форму более 90 % макроэлементов, остающихся в осадке. Продемонстрирована экологичность «мокрого» сжигания в опытах по выращиванию высших растений в герметичном объеме с включением всех продуктов реактора: минерализованного раствора и газа. Полученный при этом урожай не отличался от контрольного варианта по своим показателям.

В настоящее время ведутся работы по выявлению возможности совместного использования данного физико-химического способа с разрабатываемым параллельно биологическим методом утилизации растительных отходов – почвоподобным субстратом. Разрабатывается оптимальная конфигурация реактора «мокрого» сжигания для наиболее эффективной утилизации трудноокисляемых органических материалов – санитарно-бытовых и растительных отходов.

Способ «мокрого» сжигания в перекиси водорода в перспективе позволит повысить степень замыкания биотехнических систем жизнеобеспечения типа «Биос-3» до 93-96 % за счет вовлечения в массообменный процесс отходов жизнедеятельности человека и несъедобной растительной биомассы. Физико-химический принцип, лежащий в его основе, открывает возможность более эффективного применения данного метода в будущих марсианских и лунных базах с большой численностью экипажа. Этот факт позволяет говорить о перспективности применения данного подхода в будущих проектах по развертыванию и постепенному наращиванию инфраструктуры экспериментально-научных инопланетных поселений, таких как анонсированная на Международном астронавтическом конгрессе в 2016 году «Лунная деревня».

## ВНЕШНИЕ СИСТЕМЫ «БИОС-3»

К внешним системам комплекса относятся система энергопитания (комплекса в целом и отдельно источников света фитотронов) и система внешнего охлаждения, которая отводит тепло от внешней стены фитотронов и от источников света. Для повышения микробиологической изоляции в эксперименте применялся постоянный управляемый наддув «Биос-3» стерильным воздухом. Для этого использовалась система наддува, состоящая из мембранного компрессора, газовых баллонов, газосчетчика и микробиологического фильтра и управляемая мембранными датчиками давления, установленными на обитаемом отсеке комплекса. В результате наддува давление в этом отсеке комплекса поддерживалось на уровне выше атмосферного на 15—30 мм вод. ст.

Внешние системы в отличие от описанных в предыдущих разделах внутренних систем управлялись и обслуживались дежурным оператором внешних систем. Все отсеки и каюты экипажа «Биос-3» оснащены селекторной связью с пультом дежурного оператора внешних систем и постом дежурного врача. Запасным каналом является радиосвязь. Каюты экипажа, кроме того, оборудованы телефонной и селекторной связью с дежурным врачом.

Комплекс «Биос-3» оснащен системой промышленного телевидения, телекамеры которой установлены снаружи корпуса на окнах всех отсеков и управляются дежурным оператором внешних систем.

Как видно из описания, все технологическое оборудование, обеспечивающее функционирование звена высших растений и экипажа, расположено внутри корпуса «Биос-3» и во время эксперимента обслуживается только силами экипажа. При этом извне могут быть даны только технические консультации специалистов.