

## 2.5. Организация замкнутых круговоротов вещества в ИЭС

Конверсия энергии для обеспечения жизнедеятельности человека

$$W_{\text{ФБС}} = \eta_p \cdot \eta_n \cdot W_{\text{эл}}$$

где:  $W_{\text{ФБС}}$ , (Вт) – мощность процесса фотосинтеза биомассы в ИЭС;

$W_{\text{эл}}$ , (Вт) – мощность электроснабжения ИЭС;

$\eta_n$  – коэффициент трансформации электрической энергии в световую фотопреобразователями ИЭС;

$\eta_p$  – коэффициент трансформации световой энергии в химическую энергию фотосинтетических соединений растениями в ИЭС.

Современные фотопреобразователи, например белые светодиоды Bridgelux имеют высокий коэффициент полезного действия, превышающий 95%. Примем  $\eta_n = 0,95$ . Известно, что высшие растения преобразуют в биомассу, пригодную для питания человека 0,2 - 1,5%, падающей на них солнечной энергии. Соответственно, примем  $\eta_p = 0,01$ . Тогда, необходимую мощность электроснабжения ИЭС можно выразить как:

$$W_{\text{эл}} = W_{\text{ФБС}} / (\eta_n \cdot \eta_p)$$

Необходимая мощность биосинтеза связана с требуемой калорийностью питания человека.

Калорийность питания человека при нахождении внутри замкнутой системы жизнеобеспечения (СЖО) должна составлять 2 500 ккал/сут. Пища человека, кроме энергетической ценности, так же должна содержать порядка 600 соединений – углеводов, белков, жиров и микроэлементов, в том числе 13 витаминов, 4 витаминоподобных вещества и 21 аминокислоту.

Для обеспечения организма человека аминокислотами мясной рацион обязателен. Десять аминокислот являются незаменимыми: *аргинин; валин; гистидин; изолейцин; лейцин; лизин; метионин; треонин; триптофан; фенилаланин* – они не вырабатываются организмом самостоятельно, а поступают исключительно с белковой пищей животного происхождения.

Примерный мясной рацион при этом может составить 50 г. тушеной говядины (калорийность говядины варёной, сублимационной сушки составляет 450 ккал на 100 г. продукта) – всего: 225 ккал; 55 г. заранее заготовленной или выращенной рыбы лососевых пород (калорийность свежей, слабосоленой сёмги 187,6 ккал на 100 г.) – всего: 103,18 ккал в сутки на человека; 50 г. свиного сала (калорийность шпика копчёного 816 ккал на 100 г) – всего 408 ккал.

Всего мясо, шпик и рыба позволяют получить калорийность 736,18 ккал/сут. Выращиваемый растительный рацион будет покрывать  $2\,500 - 736,18 = 1\,763,82$  ккал/сут. Учитывая, что  $1 \text{ ккал} = 4,19 \text{ кДж}$ , получим, что энергетические потребности человека, покрываемые растительным рационом составляют:  $(1\,763,82 \times 4\,190) / (24 \times 60 \times 60) = 7\,390\,405,8 / 86\,400 = 85,54 \text{ Вт}$ .



# Производство растительного питания

## Выращиваемая растительная пища



Пшеница  
яровая



Лук - перо



Салат листовой

Выращивание высших растений в фитотроне методом разновозрастного конвейера



Томаты



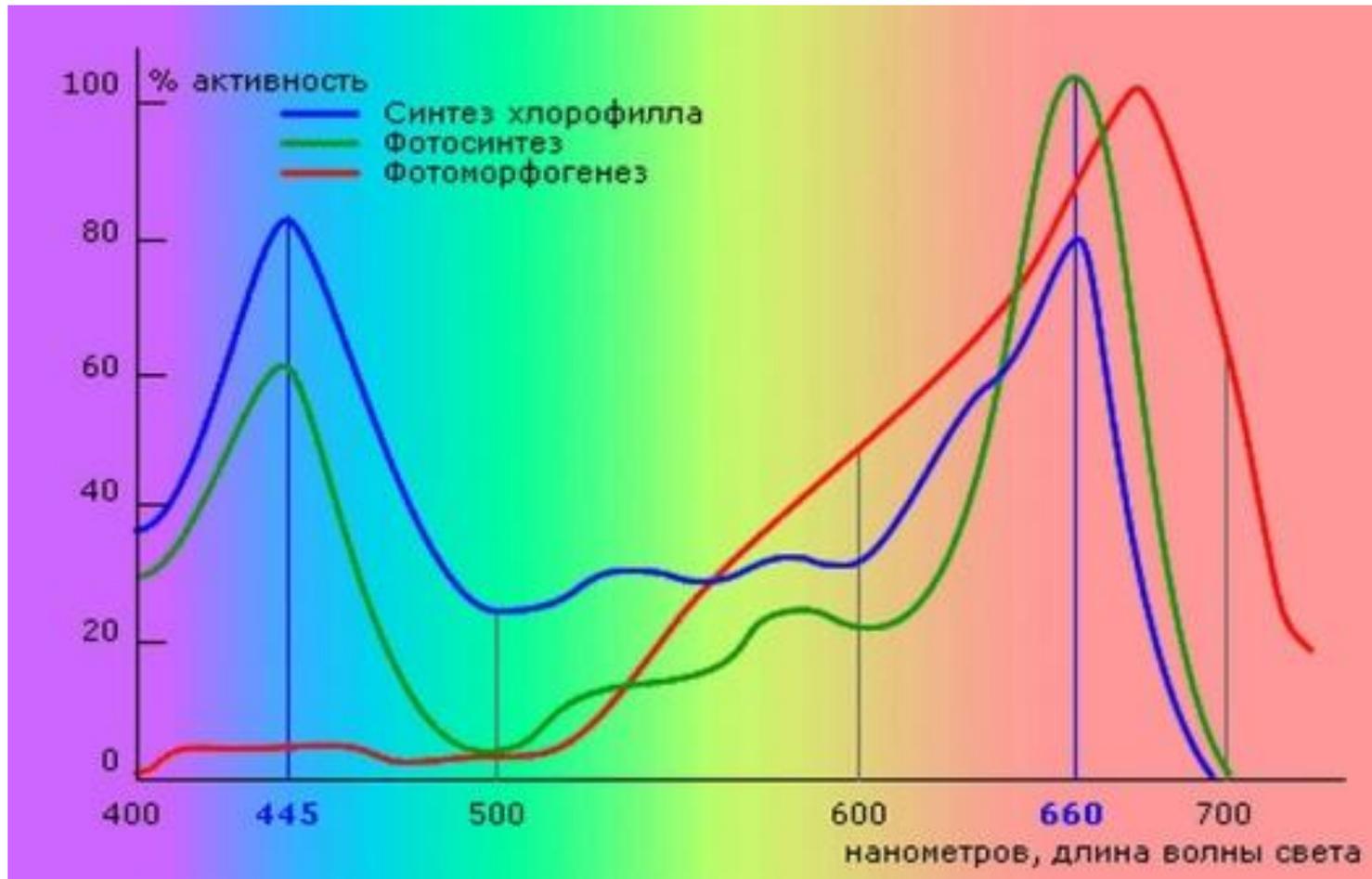
Перец сладкий



Чуфа

Так же в рацион входят: консервированное мясо, рыба, свиное сало и съедобные растения-солеросы, культивируемые на минерализованной

$$W_{\text{эл}} = 85,54 / (0,95 \times 0,01) = 85,54 / 0,0095 = 9\,004,21 \text{ Вт на 1 чел.}$$

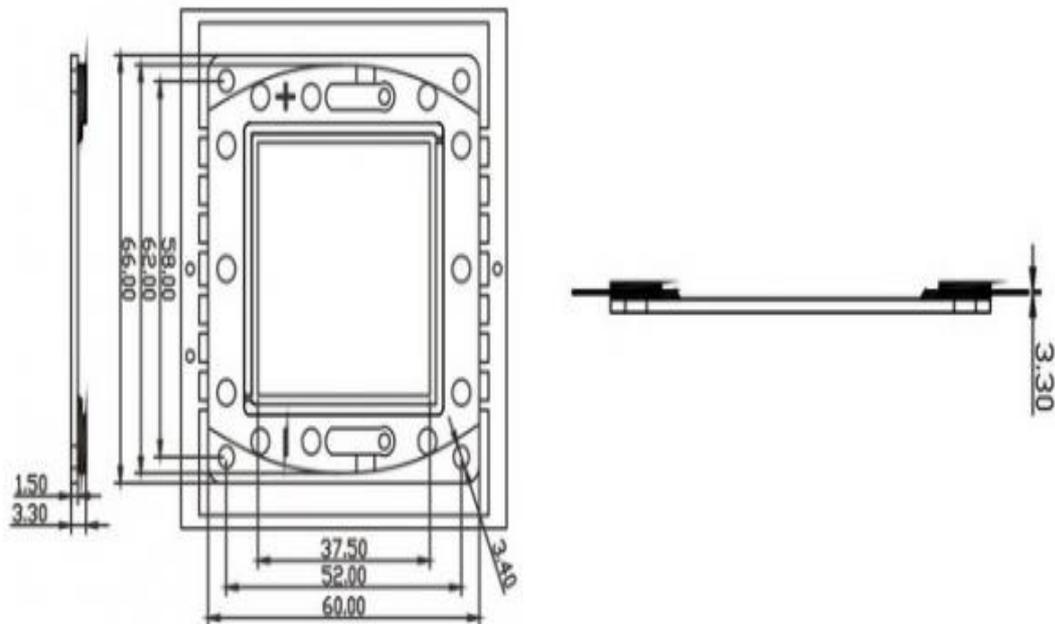


### Активность фотосинтетических процессов

ФАР – фотосинтетически активная радиация, это красный и синий участки спектра. Поэтому обычно используют красные и синие светодиоды.

Для наземного автономного обитаемого модуля проблема экономии энергии, массы и объёма неактуальна, поэтому вполне целесообразно использовать источники белого света, которые так же позволяют создать световую среду, благоприятную не только для зрения, но и для психики человека.

Для создания постоянного светового потока внутри фитотрона жилого модуля возьмём светодиодную матрицу белого света производства Bridgelux LED США.



Характеристики: потребляемая мощность: 200 Вт; рабочее напряжение постоянного тока: от 44 до 50 В; световой поток: 22 000 лм; гарантийный срок службы: 3 года.

## Расчёт продуктивности фитотрона для обеспечения растительным питанием 1 чел/сут.

Растение	Калорийность ккал / 100 г.	Требуемая съедобная масса, г / сут.	Калорийность питания, ккал / сут.
Пшеница 232	340	400	1360
Зелёный лук	19	15	2,85
Салат «Мизуна»	12	100	12
Томаты «Минибел»	20	100	20
Перец «Конфетка»	27	37	9,99
Чуфа	600	60	360
Всего:			1764,84
Требуемая:			1763,82

Назначение части растительного рациона, имеющего самую низкую калорийность, заключается в обеспечении организма человека необходимыми витаминами и микроэлементами. Так, содержание аскорбиновой кислоты (витамина С) составляет: салат «Мизуна» – 117,4 мг/100 г, томаты «Минибел» – 33,8 мг/100 г, перец красный 250 мг/100 г. Таким образом, каждый человек в модуле будет получать ежедневно  $117,4 + 33,8 + 92,5 = 243,7$  мг аскорбиновой кислоты. Это соответствует медицинским рекомендациям для людей, пребывающих в экстремальных условиях: 250 мг в день.

## Пищевая ценность ежедневного питания человека в модуле

Продукт	Масса, г	Белки, г	Жиры, г	Углеводы, г
Пшеница 232	400	56	10	284
Зелёный лук	15	0,195	0,015	0,69
Салат «Мизуна»	100	2	0,2	1,5
Томаты «Минибел»	100	0,6	0,2	4,2
Перец «Конфетка»	37	0,481	0,037	1,813
Чуфа	60	2,4	15	16,8
Мясо варёное	50	37	8	-
Рыба слабосолёная	55	10,45	12,4	-
Шпик свиной	50	0,7	40,3	-
Итого:	867	109,826	86,152	309,003
Соотношение		/ 1,3 /	/ 1 /	/ 3,7 /
		Белки, г	Жиры, г	Углеводы, г

Проведённый расчёт показывает, что соотношение белки / жиры / углеводы в рационе составляет 1,3 / 1 / 3,7 что очень близко к рекомендуемому оптимальному балансу питания человека 1 / 1 / 4

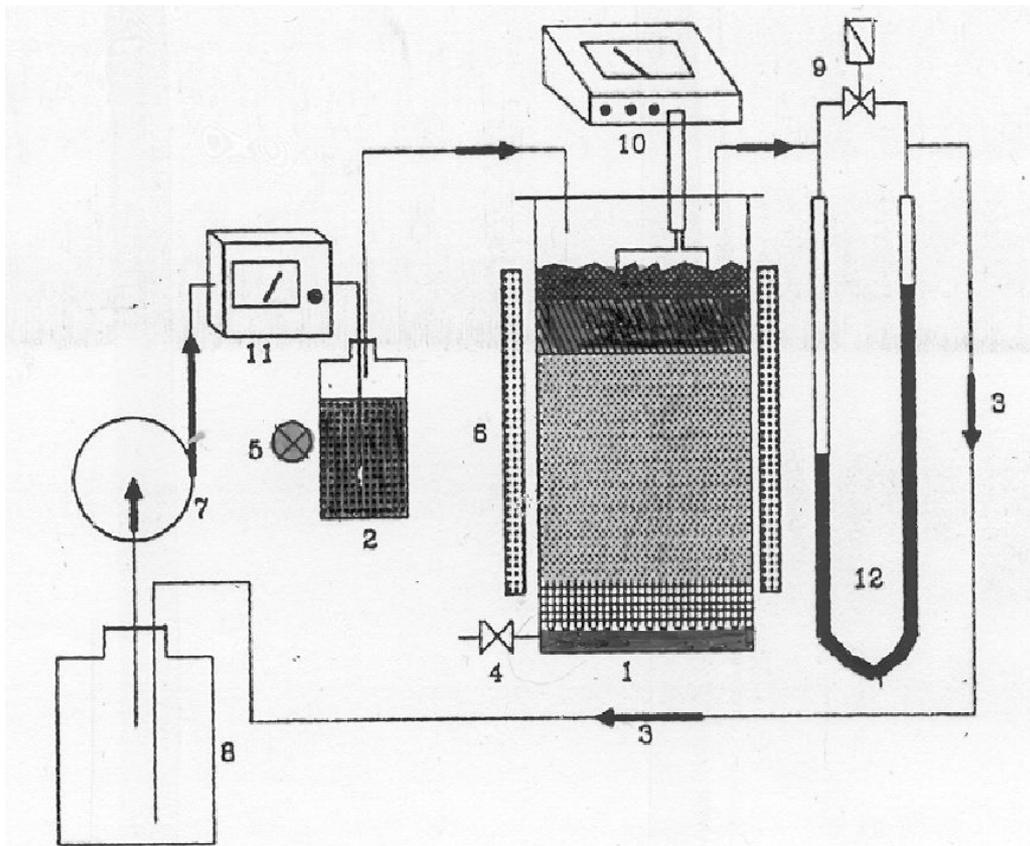
## Переработка отходов

Продукция фитотрона идёт в пищу человеку, а образующиеся отходы используются для выращивания аквакультуры. Разработанная компанией «GrowUp» технология позволяет создать систему, в которой отходы жизнедеятельности рыб используются для создания питательной среды для растений и наоборот, отходы пищевых растений служат кормом для рыбы. Общий вид «городской фермы» GrowUp Vox и резервуара для разведения рыбы представлены на фото.

Для питания рыбы так же используется фитопланктон – то есть выращенные в культиваторах микроводоросли и отходы от производства пшеничной муки и масла из масличных культур.



## Формирование ППС



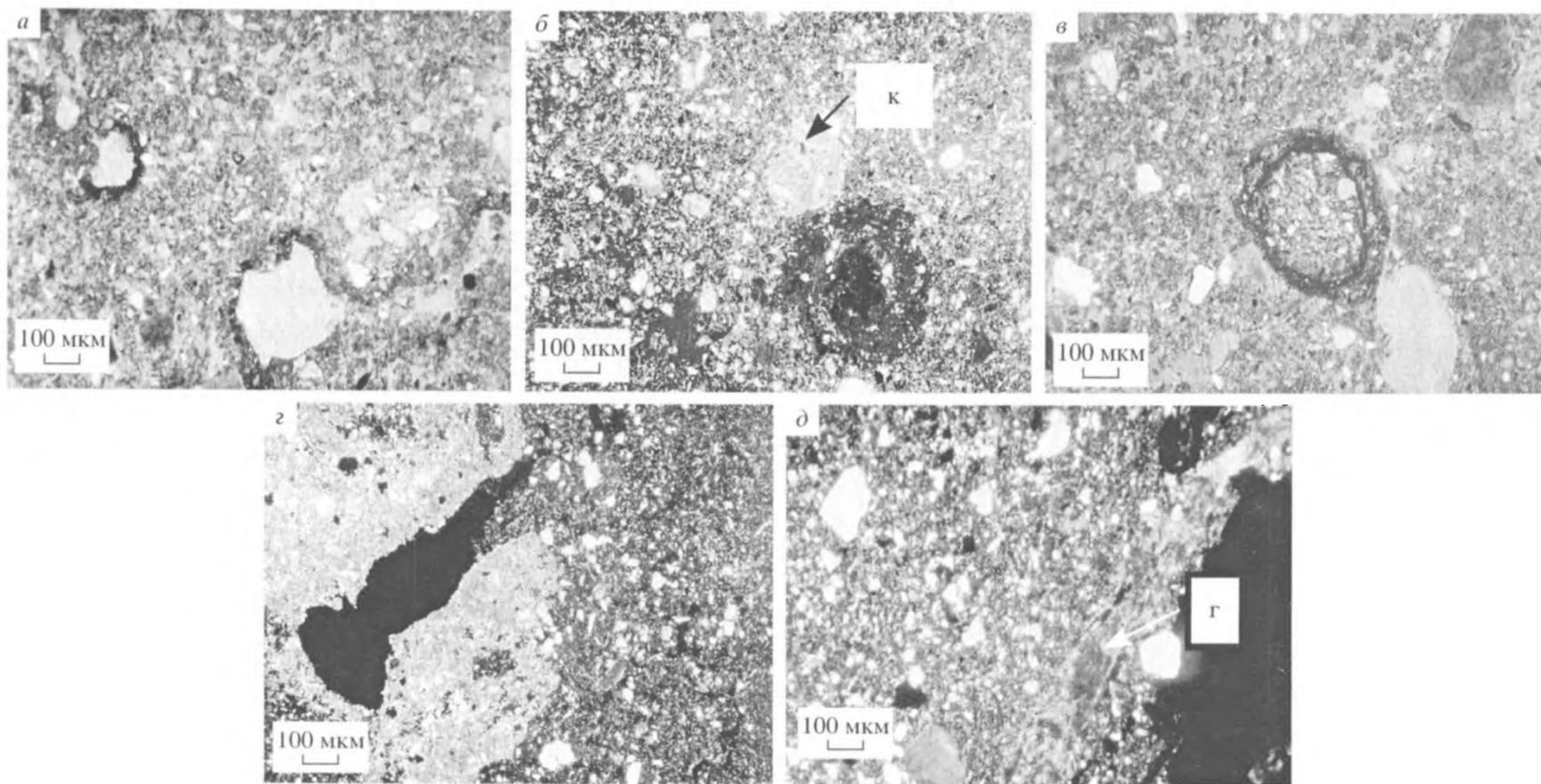
Принципиальная схема экспериментальной установки «Экотрон»

1 – блок «Педотрон», 2 – блок «Фитотрон», 3 - направление воздушного потока, 4 - штуцер отбора лизиметрических вод, образующихся при распаде органики, 5 - осветитель, 6 - терморегулирующий контур, 7 - воздушный компрессор, 8 - буферная ёмкость, 9 - электромагнитный клапан, 10 - рН-метр, 11 - инфракрасный анализатор  $\text{CO}_2$ , 12 – манометр.

«Педотрон» представляет собой стеклянный сосуд диаметром 25 см и высотой 50 см с насыпным почвенным профилем, общей толщиной 35 см, без участия высших растений. Исходным горизонтом (A0) «почвы» является специально вносимый органический опад толщиной 10 см. Материнская порода (C) - покровный суглинок.

Для создания биоты на поверхность профиля была внесена суспензия естественной серой лесной почвы и культура дождевых червей.

В результате жизнедеятельности почвенной микрофлоры и фауны в «Педотроне» осуществлялась минерализация органической массы до простых солей, поступающих в жидкую и твердую фазы, и газов, в основном  $\text{CO}_2$ , поступающих в газовую фазу. В газовую фазу также переходила часть  $\text{HCO}_3^-$ , содержащейся в материнской породе. Большая же часть органического опада подверглась деструкции и трансформации, формируя гумусовый горизонт почвы - В.



**Рис. 5.** Микростроение подгор. В1: а – железистые кутаны (N ||); б – Fe-конкреция и карбонатный нодуль (к) (N ||); в – Fe-диффузионное кольцо с включениями скелетных зерен (N ||); г – выделения микрита в вертикальной поре (N ×); д – глинистые натек (г) (N ×).

Режим функционирования «Педотрона» соответствовал условиям субтропического или влажного степного климата. За время эксперимента, продолжавшегося непрерывно один год, в исследуемой толще почвы произошли существенные изменения морфологического строения. За время экспозиции произошли изменения в составе органического вещества опада как на поверхности «Педотрона» так и на глубине в смеси с суглинком. Вся масса приобрела темную углеподобную окраску, уменьшилась в объеме, уплотнилась. Под микроскопом встречались отдельные участки коричневатой однородной массы, напоминающие по консистенции частицы естественного почвенного профиля. Результаты эксперимента в какой-то степени противоречат общепринятым представлениям о скорости формирования почвенных новообразований. В почвоведении принято считать, что образование структуры почвы является результатом тысячелетних процессов геологического масштаба. Эксперимент «ЭКОТРОН» показал, что прото- почва или почвоподобный субстрат (ППС) может сформироваться в течение одного года.

Вертикальное строение почв:

$A_0$  – «войлочный» подгоризонт

$A_1$  – перегнойно-аккумулятивный подгоризонт

$A_2$  – Элювиальный (подгоризонт вымывания)

$B$  – Иллювиальный (минеральный) горизонт

$C$  – Материнская порода

В установке «Экотрон» за год сформировались все горизонты почвы. Причём горизонт  $B$  состоял из 3-х подгоризонтов  $B_1$ ,  $B_2$  и  $BC$ .



Для выращивания грибов на ППС нужно 2 помещения, т.к. созревание грибных блоков (их затягивание мицелием) происходит неравномерно. Если держать все блоки в одном помещении, то может возникнуть следующая ситуация: часть блоков будет готова к плодоношению. Соответственно, для таких блоков необходимо изменить температурный режим. В одном помещении это сделать не удастся.

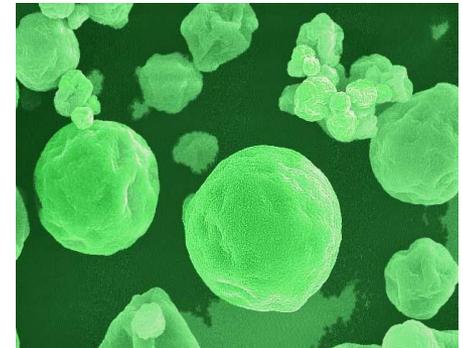
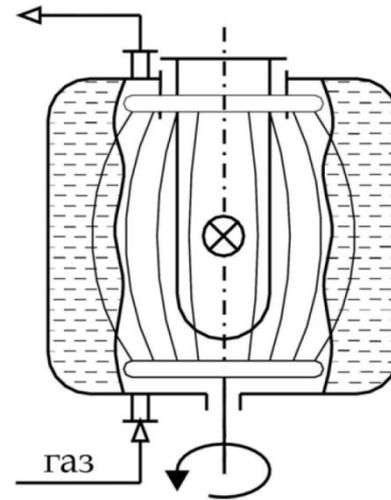
Поэтому необходимо отдельное выростное помещение, где набитые субстратом блоки прорастают. Температура в нем должна быть примерно 25 градусов. Блоки находятся в данном помещении 2-3 недели, при постоянной температуре и темноте. При зарастании мицелием блоки ощутимо нагреваются. Поэтому, необходимо ставить блоки так, чтобы они не касались друг друга, иначе, мицелий от большой температуры может погибнуть.

## Замкнутость по дыханию

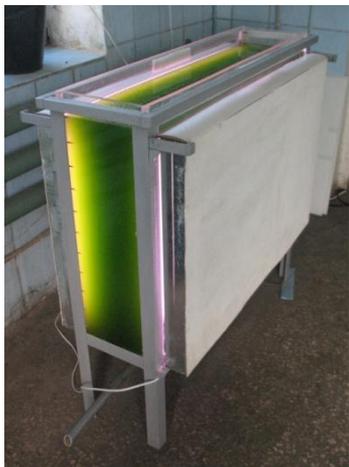
Обеспечивается разведением низших микроводорослей хлореллы в культиваторах и высших растений в фитотроне.



Полостной гладкостенный фотобиореактор с механическим перемешиванием (ФБР)



Хлорелла обыкновенная



Культиватор маточной культуры хлореллы (КМК)

Фитотро  
н



## Обеспечение равновесного газообмена: учет ассимиляционного и дыхательного коэффициентов

Ассимиляция:  $A = N_{\text{CO}_2} / N_{\text{O}_2}$  – для растений (потреб./выдел.)

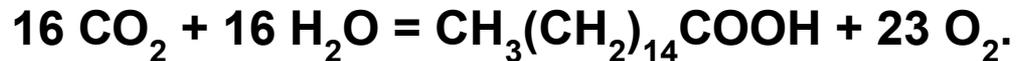
Дыхание:  $D = N_{\text{CO}_2} / N_{\text{O}_2}$  – для человека (выдел./потреб.)

**Условие равновесного газообмена:  $A \leq D$**

Пшеница:  $A = 0,94$       Человек:  $D = 0,83$

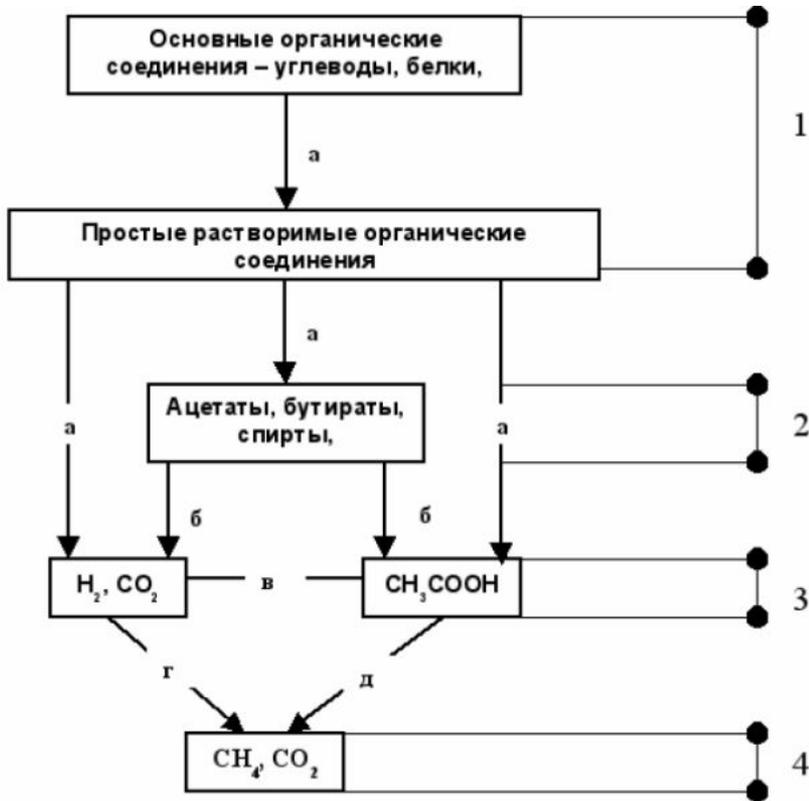
Поэтому человек и большинство высших растений не могут находиться в равновесном газообмене

При работе над программой «Биос» в Красноярске было установлено, что у масличных растений  $A$  намного меньше  $D$  человека потому, что при фотосинтезе жиров выделяется большее количество молекул  $\text{O}_2$ , чем при синтезе белков и углеводов. Для синтеза жирных кислот, на примере пальмитиновой кислоты:



Видно, что молекул кислорода образуется больше, чем потребляется молекул углекислого газа. Избыточные атомы кислорода берутся при этом из воды. Для указанной реакции  $A = 16/23 = 0,7$ . Таким образом, присоединив к посадкам пшеницы и овощей в надлежащей пропорции масличную культуру, можно сделать ассимиляционный коэффициент фототрофного звена ИЭС равным дыхательному коэффициенту человека. В установке «Биос-3» для этой цели использовалось среднеазиатское масличное растение «чужа». При этом из чужа так же можно получать растительное масло, содержащее незаменимые для питания человека жиры.

# Замкнутость по водообороту



## Участвующие группы бактерий:

**а** – ферментативные кислотогены,

**б** – ацетогены, образующие  $H_2$ ,

**в** – ацетогены, использующие  $H_2$ ,

**г** – метаногены, восстанавливающие  $CO_2$ ,

**д** – метаногены, использующие уксусную кислоту

## Стадии процесса:

**1** – гидролиз,

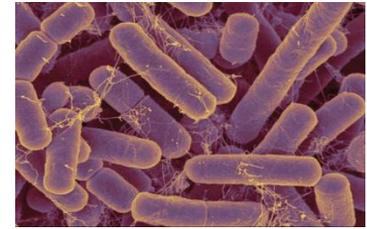
**2** – кислотообразование,

**3** – образование уксусной кислоты,

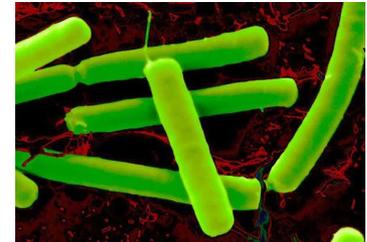
**4** – образование метана.

Схема анаэробного метанового сбраживания стоков

*Bacteroides* производят гидролиз органических соединений



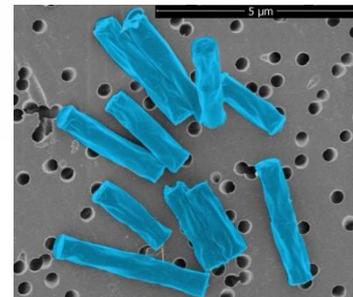
*Clostridium* выделяет уксусную кислоту,  $CO_2$ ,  $H_2$



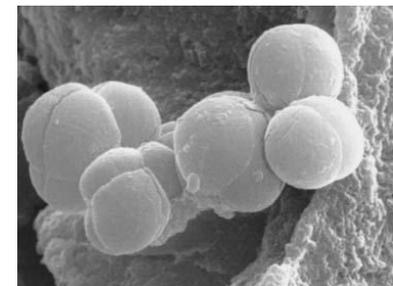
*Helicobacter* выделяет уксусную кислоту при окислении  $H_2$



*Methanosaeta* преобразует  $CO_2$  и  $H_2$  в  $CH_4$



*Methanosphaera* превращает уксусную кислоту в  $CH_4$  и  $CO_2$

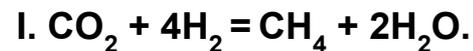


В первой фазе (кислое, или водородное брожение) из сложных органических веществ – белковоподобных, углеводоподобных и жироподобных – с участием воды образуются органические кислоты (уксусная, муравьиная, молочная, масляная, пропионовая и др.), спирты (метиловый, этиловый, пропиловый, бутиловый и др.), газы (диоксид углерода, водород, сероводород, аммиак), аминокислоты, нитраты, глицерин и проч. Этот распад осуществляют обычные сапрофитные анаэробы, которые широко распространены в природе, в том числе, содержатся в выделениях человека. Они быстро размножаются и проявляют свою жизнедеятельность при pH среды 4,5 – 7.

Образовывать метан способны не все анаэробные бактерии, а только особая группа, называемая археобактерии или археи (т.е. «древнейшие»). Археи представляют собой одноклеточные микроорганизмы, не имеющие ядра, а также мембранных структур. Характерно, что вся энергия их обмена веществ направлена на образование метана в качестве главного конечного продукта метаболизма. Они не только осуществляют химическое превращение энергии, но и перерабатывают создаваемый всеми отмершими бактериями субстрат. Биохимическим путем метан образуется из относительно простых органических веществ – углекислого газа, кислот и спиртов, которые являются производными низших представителей ряда неопредельных углеводов.

Собственно метаногенез осуществляют около 50 известных к настоящему времени видов бактерий, относящихся к 13 родам, в том числе *Methanobacterium*, *Methanogenium*, *Methanobrevibacter*, *Methanosphaera*, *Methanothermus*, *Methanococcus*, *Methanocorpusculum*, *Methanoculleus*, *Methanofollis*, *Methanopyrus*, *Methanoregula*, *Methanosaeta*, *Methanosarcina*, *Methanolobus*, *Methanospirillum*, *Methanothrix* и многие другие.

Микроорганизмы – метаногены делятся на две группы: Первая группа производит восстановление CO<sub>2</sub>, метанола, муравьиной кислоты и других органических соединений водородом:

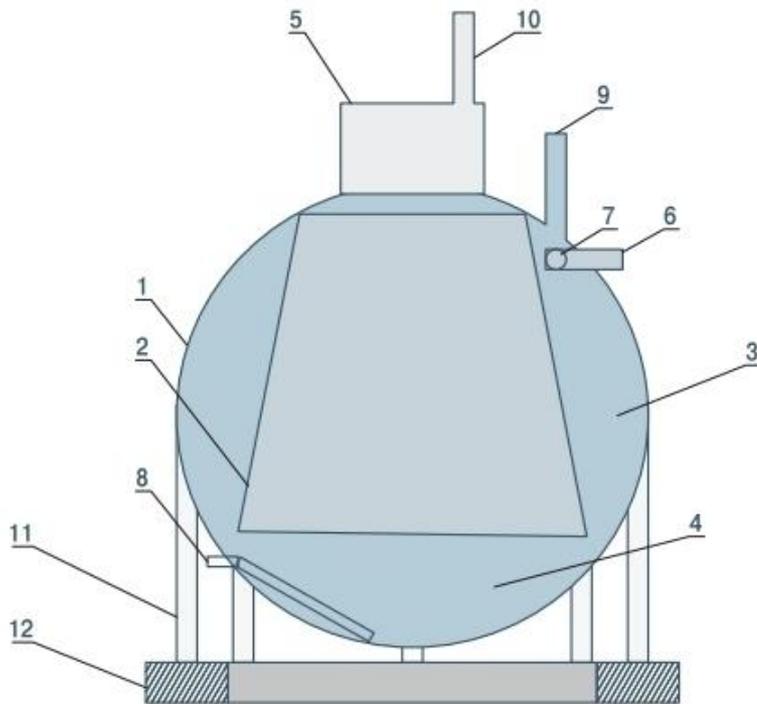


Метановые бактерии первой группы являются единственными на Земле организмами, способными утилизировать диоксид углерода без хлорофилла и поглощения солнечной энергии. Вторая группа метанобактерий производит расщепление уксусной кислоты:



При нормальном режиме работы метантенка, по первому механизму образуется 72% метана, а по второму – 28%. Метан в составе биогаза может использоваться в качестве топлива МТУ.

## Сферический метантенк – септик



- 1 – Резервуар;
- 2 – Перегородка для разделения зон брожения;
- 3 – Внешняя камера 1 фазы сбраживания;
- 4 – Внутренняя камера 2 фазы сбраживания;
- 5 – Газосборная горловина;
- 6 – Патрубок, подающий органический раствор;
- 7 – Система распределения раствора;
- 8 – Патрубок отвода осадка;
- 9, 10 – Патрубки для отвода газов;
- 11 – Опорные стойки;
- 12 – Основание.



Обессоливание очищенной воды и возврат NaCl в пищевую цепочку человека: растения – солеросы (галофиты). Солерос европейский (*Salicornia europaea*), однолетнее растение семейства амарантовых способен накапливать NaCl в количестве до 50% от сухой массы.

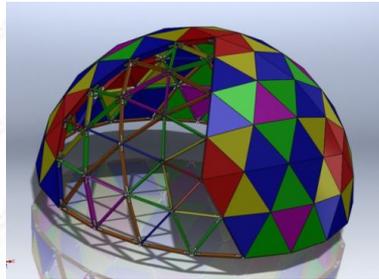
# Сооружения модуля

Оборудование модуля размещается внутри купольного сооружения. Купольные сооружения имеют ряд преимуществ перед традиционными постройками:

- купола имеют высокую удельную прочность (т.е. отношение предела прочности к весу конструкции), чем прямоугольные здания, занимающие ту же площадь;

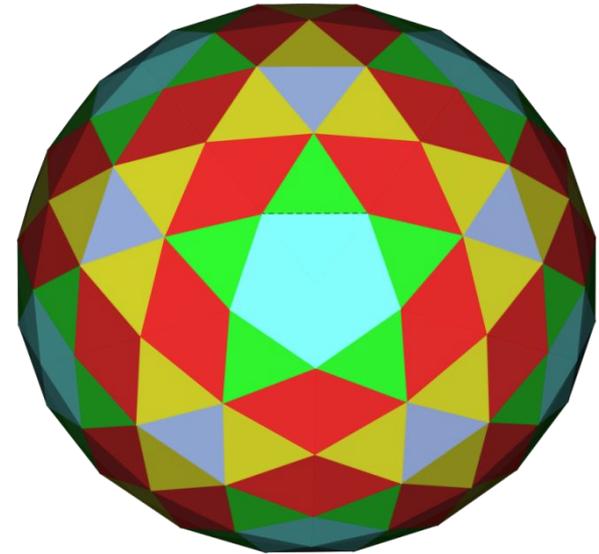
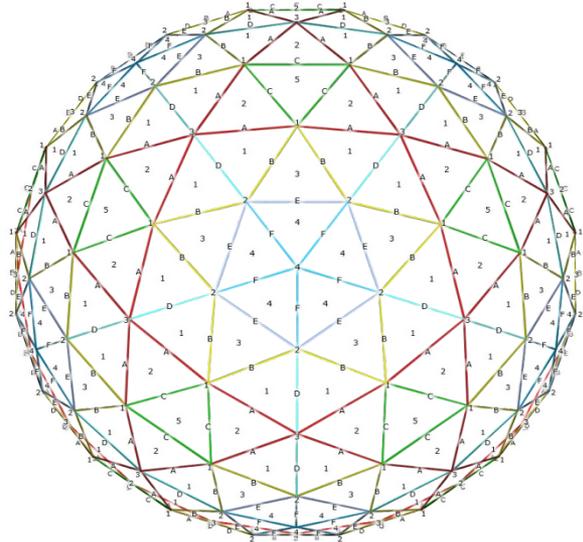
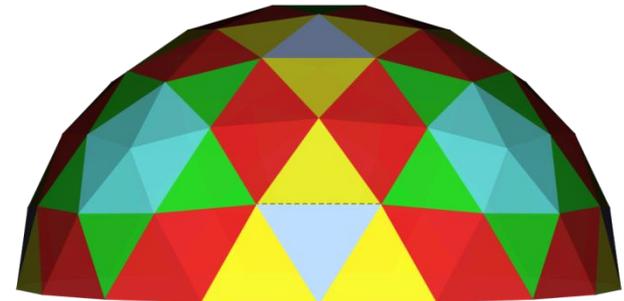
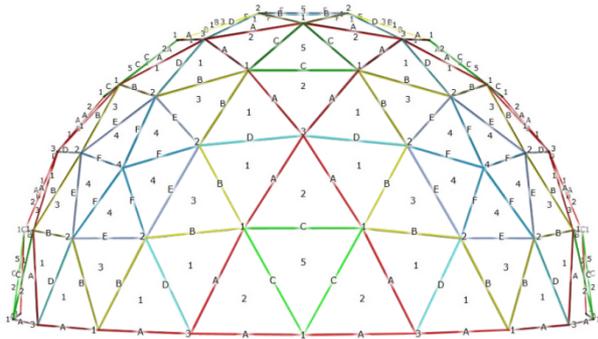
- при одной и той же полезной площади, у прямоугольного дома площадь ограждающих поверхностей больше, чем у купола, а, следовательно, и теплопотери/теплопоступления у прямоугольного здания той же площади будут выше;

- плавно искривленная поверхность стен внутри купола способствует естественной циркуляции воздуха и эффективному воздухообмену в помещении. Натуральные кольцеобразные течения способствуют перемешиванию воздуха, и его температура остается одинаковой по всему подкупольному объему.



# Купольное сооружение модуля

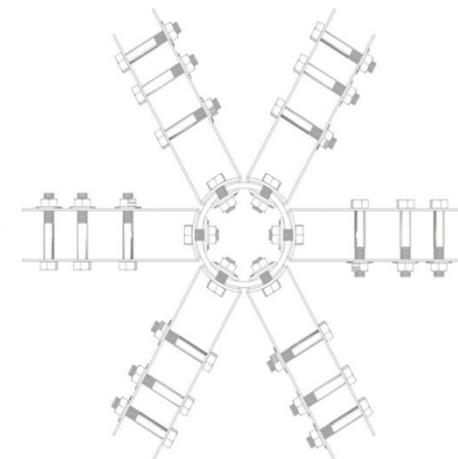
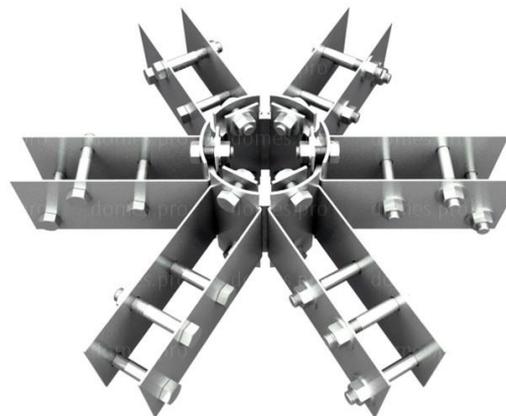
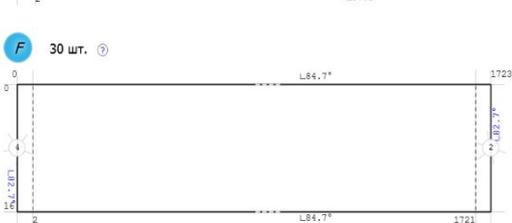
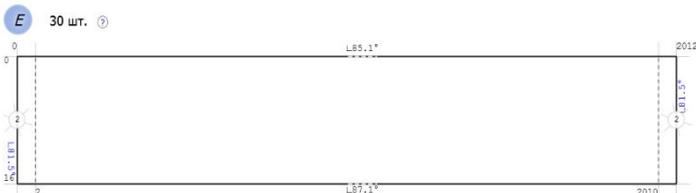
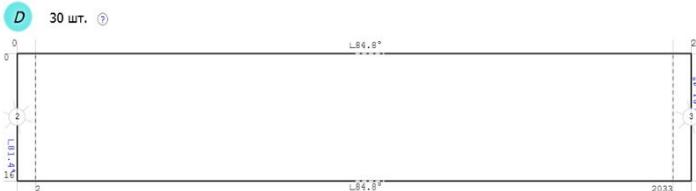
Тип конструкции	Элементы сетки	Метод разбиения сферической поверхности	Радиус сферы, м	Часть сферы каркаса	Высота от основания купола	Площадь основания, м <sup>2</sup>	Площадь покрытия, м <sup>2</sup>
Сетка Фуллера	Треугольные	Равные хорды	6,87	1/2	6,87	145,85	290,95



Каркас из прямых трубчатых балок

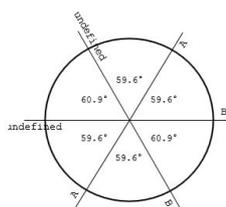
Купол с наружной облицовкой

# Конструктивные элементы купольного сооружения

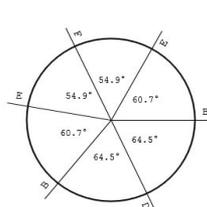


Коннекторы узлов каркаса купола

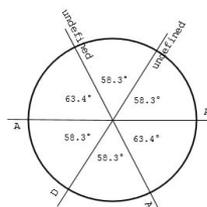
**1** 35 шт.



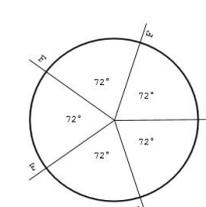
**2** 30 шт.



**3** 20 шт.

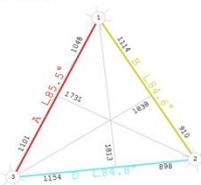


**4** 6 шт.

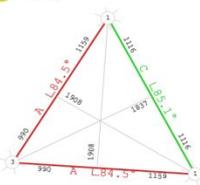


Конфигурация коннекторов

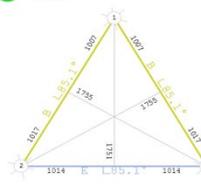
**1** 60 шт.



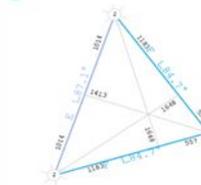
**2** 30 шт.



**3** 30 шт.



**4** 30 шт.



**5** 10 шт.



Балки каркаса купола

Конфигурация граней купола

## Облицовочный материал купола

В качестве материала купола будет использоваться пенополиэтилен – прочный и эластичный вспененный многослойный физически сшитый материал с высокой теплоизоляцией. Марка этого материала под названием «Пенолон», выпускается компанией «Руссфом». Форма выпуска: при толщине материала от 5 до 15 мм – рулоны; свыше 15 мм – листы (маты). Соединение листов для большей надёжности облицовки осуществляется путём их спаивания друг с другом термическим способом. При необходимости демонтажа облицовки, пенолон разрезается вдоль граней купола на отдельные листы, которые могут быть вновь спаяны при монтаже купола на новом месте.

Пенолон совместим со всеми конструкционными материалами, устойчив к ультрафиолетовому излучению, масло-, нефте- и бензостоек. Пенолон не гниёт и не выделяет вредных веществ при нагреве. Нетоксичен и не имеет запаха. Для отражения внешнего теплопоступления от солнечного излучения и для лучшего соскальзывания снега с купола, пенолон с внешней стороны может быть покрыт тонким слоем матовой алюминиевой фольги. Внешний вид и параметры мат из пенолона марки ППЭ-Р:



Плотность: 33 кг/м<sup>3</sup>

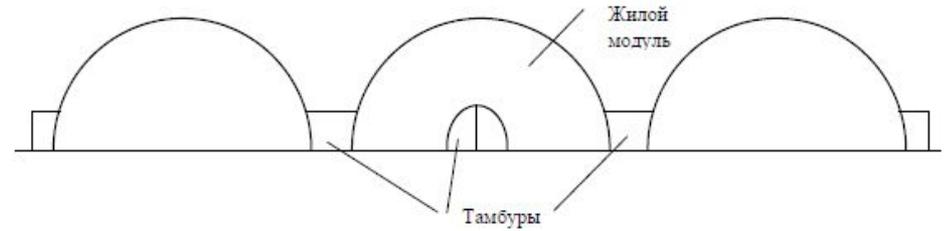
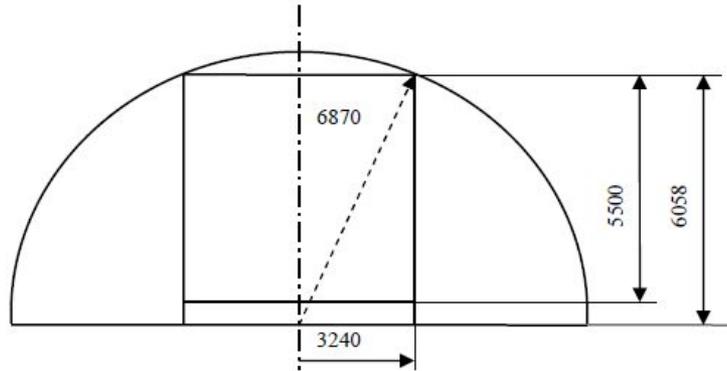
Теплопроводность: 0,036 Вт/(м·°С)

Диапазон температур: от -60 до +120°  
С

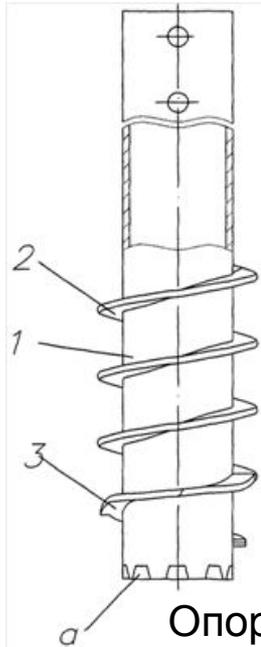
Водопоглощение по объёму: < 1 %

Срок службы: 25 лет

# Компоновка модуля и схема его размещения на местности



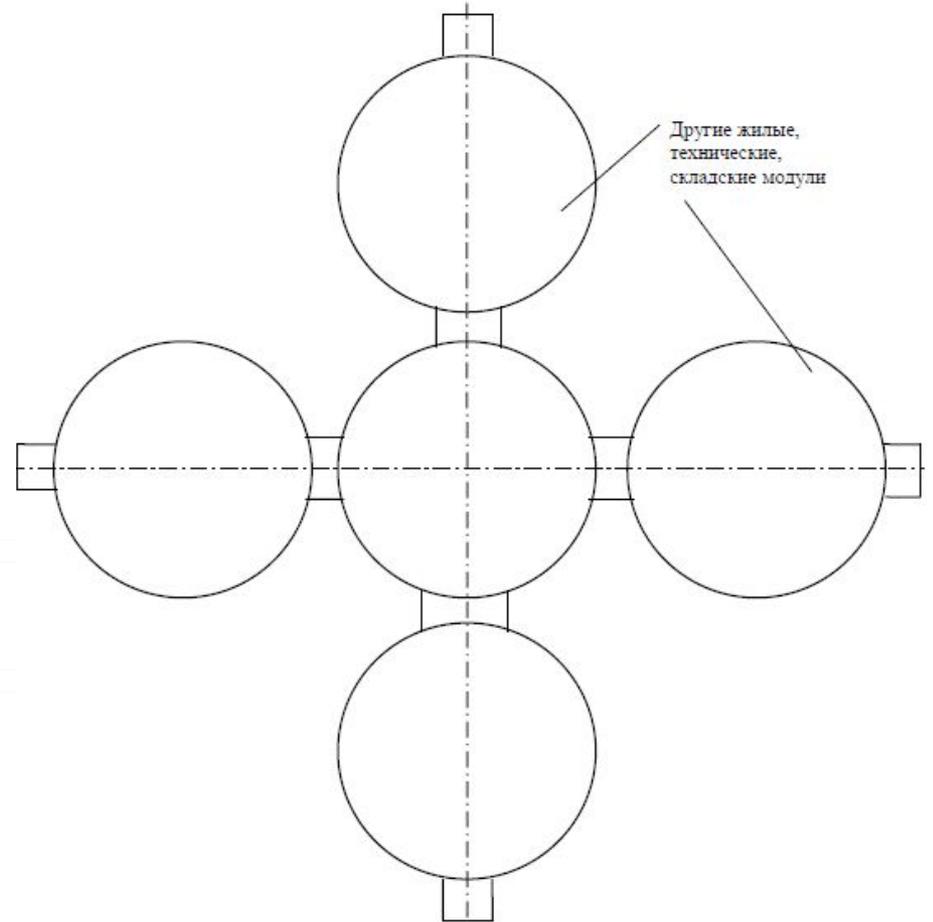
## Размещение цилиндрического фитотрона под куполом модуля



- а – Прорези;
- 1 – Полый ствол;
- 2 – Винтовые лопасти;
- 3 – Резцы;



Опорная свая для грунтов с вечной мерзлотой



## Купол Фуллера на даче



Состав внутреннего оборудования для серии автономных жилых модулей  
+ обязательно; +/- желательно; - не требуется.

Оборудование	Вид территории размещения			
	Арктические пустыни	Аридные пустыни	Территории химического загрязнения	Зоны радиационного заражения
Система замкнутого газообмена	-	-	+/-	+
Система производства растительного питания	+	+	+/-	+
Система замкнутого водооборота	-	+	+/-	+
Система производства почвенноподобного субстрата	-	+	-	-
Система отопления	+	-	+/-	+/-
Система охлаждения	-	+	+/-	+/-
Система вентиляции	+	+	+/-	-
Система				

## Заключение

Компонуя на одной площадке необходимое количество жилых, технических и складских модулей можно составить целый город, среда обитания в котором так же будет базироваться на принципах использования «живого вещества» биосферы, замкнутости материальных потоков и гомеостаза климатических и химических факторов. Статус «экологического города» может быть присвоен такому «модульному поселению» после формирования в нём сферы занятости населения и создания социальной среды.

План экологизации – то есть переходу к новой техносфере может начаться с пилотного проекта восстановления сильно нарушенных экосистем, который основывается на постепенной интеграции отдельных модулей в экопоселение и включает в себя следующие этапы:

- выбор региона с оценкой характера и степени его экологической нарушенности;
- строительство небольших автономных жилых модулей;
- объединение жилых модулей в городское экопоселение;
- проведение долгосрочных работ по восстановлению природной среды в регионе размещения экогорода.