

УДК: 51-76

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-2-0501-0517>

EDN: [FDINJR](https://www.edn.net/FDINJR)



Моделирование круговорота воды в биорегенеративной системе жизнеобеспечения

Н. С. Мануковский¹, Г. И. Саркисян²

¹*Институт биофизики СО РАН – Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия*

²*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия*

Аннотация. Работа посвящена моделированию круговорота воды в биорегенеративной системы жизнеобеспечения человека. Рассмотрена схема замкнутого гидрологического цикла, включающая звенья человека и растений, модули приготовления пищи, обработки отходов, накопления воды. Для каждого функционального элемента определены каналы водообмена и, соответствующие уравнения динамики, поступления и расхода воды. В расчетах по модели учитываются уровни относительной влажности воздушной среды периодичность полива растений, поступления от человека переработанных отходов, накопление и перераспределение сконденсированной из атмосферы воды по звеньям и модулям системы. Результаты расчетов динамики водообмена для штатного режима функционирования системы и при отказе кондиционера представлены графиками. Разработанная компьютерная модель замкнутого круговорота воды может быть полезна при проектировании систем жизнеобеспечения, настройки и оптимизации процессов межзвенного водообмена, создании тренажеров для подготовки экипажей.

Ключевые слова: биорегенеративная система жизнеобеспечения, круговорот воды, компьютерная модель водообмена.

Для цитирования: Мануковский, Н. С., & Саркисян, Г. И. (2023). Моделирование круговорота воды в биорегенеративной системе жизнеобеспечения. Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies, 3(2), 0501–0517. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-2-0501-0517>

Modeling the water cycle in a bio-regenerative life support system

N. S. Manukovsky¹, G. I. Sarkisyan²

¹*Institute of Biophysics SB RAS, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS” Krasnoyarsk, Russia*

²*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia*

Abstract. The work is devoted to modeling the water cycle in the bio-regenerative life support system. The scheme of closed hydrological cycle, including human and plant links, modules of food preparation, waste treatment, water accumulation is considered. For each functional element, water exchange canals and corresponding equations of dynamics, water inflow and outflow are determined. In calculations according to the model the levels of relative humidity of air environment, periodicity of watering of plants, ingress from man of processed wastes, accumulation and redistribution of water condensed from atmosphere on links and modules of the system are taken into account. The results of calculations of the dynamics of water exchange for the normal mode of operation of the system and in case of air conditioner failure are presented in graphs. The developed computer model of the closed water cycle can be useful in the design of life support systems, adjustment and optimization of inter-link water exchange processes, creation of simulators for crew training.

Keywords: bio-regenerative life support system, water cycle, computer model of water exchange.

For citation: Manukovsky, N. S., & Sarkisyan, G. I. (2023). Modeling the water cycle in a bio-regenerative life support system. *Modern Innovations, Systems and Technologies*, 3(2), 0501–0517. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-2-0501-0517>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование биорегенеративных систем жизнеобеспечения (БСЖО) человека с замкнутым круговоротом веществ рассматривается как перспективный вариант в освоении человеком территорий с экстремальным климатом, а также Луны и Марса. Как показали эксперименты, проведенные в разных странах БСЖО, созданные по принципу функционального микроподобия биосферы, способны обеспечить основные средообразующие функции в отношении человека: регенерацию воздуха, воды и частично пищи. [1-7].

Круговорот воды или гидрологический цикл формирует в БСЖО каналы взаимосвязи между отдельными звеньями и является опорным интегрирующим процессом в отношении других биохимических циклов не способных функционировать вне движения водных масс. Основной вклад в круговорот воды вносят процессы испарения воды, перенос и конденсация паров с образованием жидкой фазы, возвратного движения воды к месту потребления и испарения [8].

Как и в земной биосфере, движение водных масс в БСЖО происходит под действием энергии света, основная часть которой рассеивается в виде тепла. Так, в системе “Биос-3” установленная мощность источников света на квадратный метр посевной площади составляла 6 квт, а световая мощность 0,65 квт. В процессе фотосинтеза связывалось около 1% от подводимой электрической энергии, т.е. почти вся

подводимая энергия трансформировалась в тепло. Тепло в системе отводили потоком водопроводной воды с температурой около 10°C и расходом до 8 м³/ч [1].

Перед запуском БСЖО общий объем воды и ожидаемые скорости межзвенного водообмена уточняют исходя из результатов, полученных в предварительных экспериментах. Такие эксперименты требуют затрат средств и времени, и не могут быть проведены экипажем БСЖО в оперативном режиме, например, при вынужденном изменении схемы водообмена или при возникновении аварийной ситуации. Таким образом, задача быстрой перенастройки параметров водообмена в системе остается актуальной. Как показывает опыт, оперативное внесение необходимых поправок помогает использование соответствующих компьютерных моделей. С этой целью была проведена разработка компьютерной модели круговорота воды для гипотетической БСЖО, основными звеньями которой являются человек и фотосинтезирующие организмы.

МЕТОДЫ

Схема модели водообмена в БСЖО

Для построения модели гидрологического цикла были выбраны семь элементов: звенья человек и растения, модули накопления воды, приготовления пищи и обработки отходов, а также атмосферы обитаемого блока и эко блока. Схема водообмена между элементами представлена на рисунке 1.

На схеме выделены два блока: эко блок, в который вошли звено высших растений, атмосфера, модуль накопления воды и обитаемый блок, включающий звено человека, атмосферу, модули обработки отходов и приготовления пищи. Обозначения звеньев и модулей БСЖО, а также исходные массы воды для каждого функционального элемента гидрологического цикла даны в таблице 1.

Для упрощения в расчетах по модели приняли, что человек все свои потребности в пище удовлетворяет за счет растительного звена с посевной площадью 50 м² и не использует запасы. В остальном, ориентировались на базовые параметры экспериментальной системы “Биос-3” [1-3].

Описание водообменных потоков функциональных элементов составлено отдельно для каждого блока.

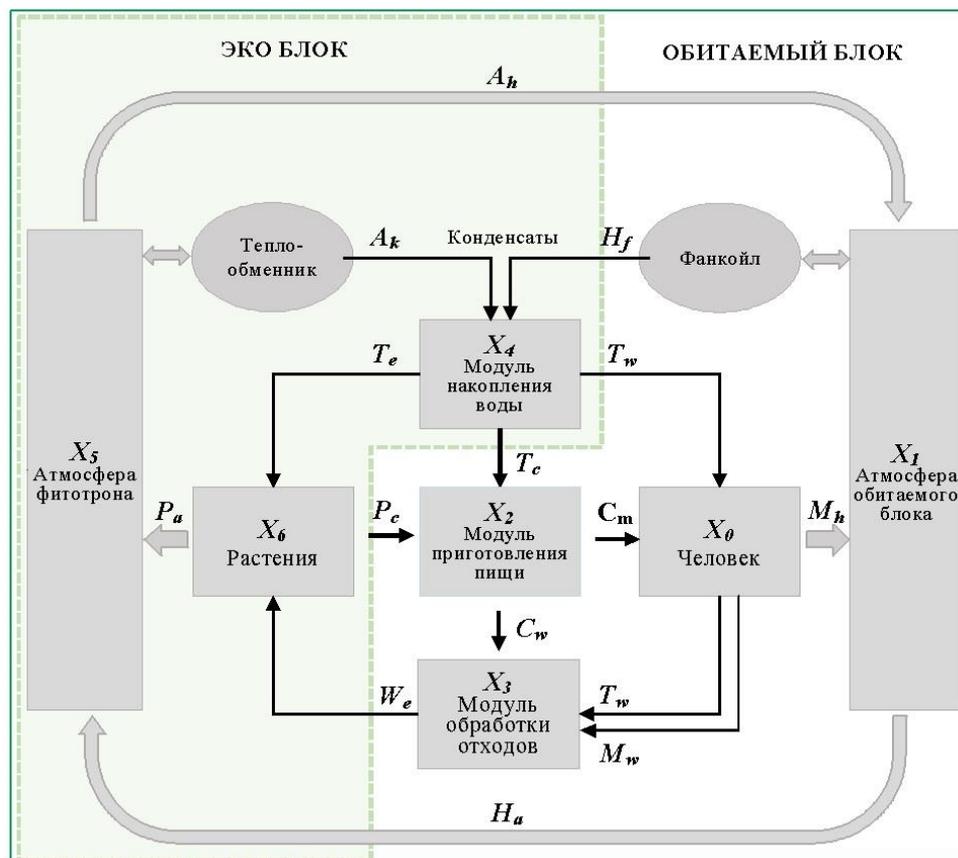


Рисунок 1. Схема водообмена в двухзвенной БСЖО: «человек – высшие растения».

Обозначены: звенья и модули (прямоугольники), устройства теплообмена и кондиционирования воздуха (овалы), потоки внутрисистемного водообмена (стрелки).

Figure 1. Scheme of water exchange in two-link BLSS: "man - higher plants".
Marked: links and modules (rectangles), heat exchange and air conditioning devices (ovals),
flows of intra-system water exchange (arrows).

Таблица 1. Обозначения и начальное количество воды в звеньях и модулях БСЖО.

Table 1. Designations and initial quantities of water in links and modules of the BLSS.

Наименование масс воды	Обозначения	Масса воды, кг
“Обменная” вода в организме человека	X_0	3
Атмосферная влага обитаемого модуля	X_1	1
Вода в модуле приготовления пищи	X_2	1
Вода в модуле обработки отходов	X_3	10
Вода в модуле накопления воды	X_4	500

Атмосферная влага эко блока	X_5	2
Вода в биомассе растений и субстрате	X_6	700

Показатели водообмена функциональных элементов в обитаемом блоке

Вода поступает человеку с питьём и пищей из модуля приготовления пищи, выделяется с дыханием и потом в атмосферу обитаемого блока, а также с влагосодержащими продуктами жизнедеятельности в модуль обработки отходов. Скорость водообменных процессов в обитаемом блоке были определены таким образом, чтобы человек потреблял/выделял воду в соответствии со своими естественными потребностями.

Звено человека

В норме, суточный водный баланс человека в зависимости от массы тела и физических нагрузках колеблется в пределах 2,5 – 3,5 литра. Для конкретности в расчетах параметры водного баланса человека определены постоянными величинами, которые даны в таблице 2.

Таблица 2. Структура водного баланса человека

Table 2. Structure of human water balance

Потребление	кг/сутки	Выделение воды	кг/сутки
Питьевая вода	1.98	С потом и при дыхании	1.8
Вода с готовой пищей	1.15	В составе урины	1.58
Метаболическая вода	0.35	В составе фекалий	0.1
Всего	3.48	Всего	3.48

Исходя из принятых величин, человек в среднем потребляет и выделяет 3.48 кг воды в сутки или 145 граммов в час. Эту часть воды, отнесенную к «обменной», характеризовали переменной – X_0 . Больше или меньшее количество воды этого водообменного фонда всегда остается в организме человека. Соответствующее уравнение для этой части обменной воды составлено так:

$$\frac{dX_0}{dt} = C_m - M_m \cdot \frac{1}{1 + e^{(M - X_0)}} - M_h, \quad (1)$$

где C_m – вода, поступающая с напитками и пищей, включая метаболическую воду, кг/час; M_m – вода, исходящая от человека с уриной и фекалиями, кг/час; M_h – вода, выделяемая с выдыхаемым воздухом и потом, кг/час; M – масса обменной воды, в норме в организме человека, кг.

Дополнительно человек использует воду (конденсаты) для санитарно-гигиенических целей, примерно 12 кг в сутки, и такое же количество сточно-бытовой воды удаляется из обитаемого блока с отходами. Эта вода проходит из накопительной емкости (X_4) транзитом через модуль человека в модуль обработки отходов (X_3), поэтому в уравнении для обменной воды человека её не учитывают.

Атмосфера обитаемого блока

Кондиционирование воздуха обитаемого блока происходит с помощью фанкойла - устройства с встроенным вентилятором и радиатором (теплообменником) осуществляющего местную рециркуляцию. Базовые параметры атмосферы обитаемого блока даны в таблице 3.

Таблица 3. Параметры воздушной среды обитаемого блока модельной системы БСЖО
Table 3: Parameters of the air environment of the habitable block of the model BLSS

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Величина
Объем	V_h	м ³	100
Температура	T	°С	24
Относительная влажность		%	50
Абсолютная влажность		кг/м ³	0.0109
Воздухообмен на фанкойле	h	м ³ /час	20
Воздухообмен между блоками	R	м ³ /час	60-90

Уравнение для характеристики изменений массы воды (X_1) в атмосфере обитаемого блока составлено следующим образом:

$$\frac{dX_1}{dt} = R \cdot \left(\frac{X_5}{V_e} - \frac{X_1}{V_h} \right) + M_h - h \cdot \alpha \cdot \frac{X_1}{V_h}, \quad (2)$$

где R – интенсивность воздухообмена между блоками, м³/час; V_e – объем атмосферы эко блока, м³; V_h – объем атмосферы обитаемого блока м³; M_h – поступление воды с

выдыхаемым воздухом и потом от человека, кг/час; h – интенсивность воздухообмена через кондиционер (фанкойл), м³/час; α – доля влаги воздуха, перешедшая в конденсат.

Модуль приготовления пищи

В модуль приготовления пищи вода поступает из емкости для воды со средней скоростью $T_c = 0.15$ кг/час, и в составе пищи, из эко блока ($E_c = 0,05$ кг/час). Вода, с приготовленной пищи и кухонными отходами выводится, соответственно человеку и в модуль обработки отходов. Уравнение баланса воды в модуле имеет вид:

$$\frac{dX_2}{dt} = T_c + E_c - C_m - C_w, \quad (3)$$

где T_c – вода из накопительного модуля, кг/час; E_c – вода из фитотрона в составе ингредиентов пищи, кг/час; C_m – вода в составе готовой пищи к человеку кг/час; C_w – вода с кухонными отходами в модуль обработки отходов, кг/час.

Для этого модуля все потоки воды в составе влагосодержащих компонентов определены как средние постоянные величины. Поэтому баланс водообмена в модуле имеет нулевое значение. В реальности же поступление и выведение воды из модуля носит периодический характер.

Модуль обработки отходов

В модуле обработки отходов поступают влагосодержащие продукты жизнедеятельности от человека, сточно-бытовая вода – 12 литров в сутки (0,5 литров в час) и вода в составе кухонных отходов. Из модуля вода органических удобрений периодически, один раз в сутки, поступает во время полива растений в эко блок. Уравнение, отражающее изменения массы воды в модуле составлено так:

$$\frac{dX_3}{dt} = M_m \cdot \frac{1}{1 + e^{(M-X_0)}} + T_w + C_w - W_e, \quad (4)$$

где T_w – сточно-бытовая вода от человека, кг/час; M_m – вода, с уриной и фекалиями от человека, кг/час;

Скорость перекачки жидких удобрений, к растениям определена так:

$$W_e = \beta_1 \cdot \frac{v1 \cdot X_3}{k + X_3}, \quad (5)$$

где $v1$ – скорость подачи жидких удобрений в звено растений, кг/час; k – константа, равная величине остатка жидких удобрений в модуле, при которой скорость их подачи в звено растений в два раза ниже $v1$; β_1 – функция регулятор;

Функции регулятор β_1 определяет частоту и продолжительность периодов подачи влагосодержащих удобрений в звено растений. Функция β_1 принимает значения 0 или 1 и составлена как комбинация периодической функции $\sin(t)$ и экспоненциальной функции e^x :

$$\beta_1 = 1 - \frac{1}{1 + e^{\left(w - \left| \sin \frac{\pi}{24} t + 24.1 \right| \right) / w1}}, \quad (6)$$

где w и $w1$ – безразмерные подгоночные коэффициенты; t – время в часах.

С помощью подгоночных коэффициентов w и $w1$ задают длительность периода в течение, которого работает насос, перекачивающий влагосодержащие удобрения в эко блок к растениям. При расчетах по модели их значения установили 0.05 и 0.03 соответственно. Состав всех влагосодержащих потоков обитаемого блока приведен в таблице 4.

Таблица 4. Влагосодержащие потоки в обитаемом блоке.

Table 4. Moisture fluxes in the habitable block.

Звено / элемент гидрологического цикла	Влагосодержащий поток на входе (+) и выходе (-) звена / элемента гидрологического цикла.	Обозначение потока	Скорость переноса воды с влагосодержащими потоками кг/час
X_0 Звено человек	(+) напитки и блюда	C_m	0.145
	(-) урина и кал	M_w	$M_w = M_m(1 + \exp\{M - X_0\})^{-1}$
	(-) пот и выдыхаемый воздух	M_h	0.075
X_1 Атмосфера обитаемого блока	(+) влажный воздух из эко блока	A_h	$A_h = R(X_6/V_e)$
	(+) пот и выдыхаемый воздух	M_h	0.075
	(-) конденсат из фанкойла	H_f	$H_f = h(X_1/V_h)$
	(-) влажный воздух в эко блок	H_a	$H_a = R(X_1/V_h)$
X_2 Модуль приготовления пищи	(+) из модуля накопления воды	T_c	0.15
	(+) ингредиенты пищи из эко блока	E_c	0.05
	(-) готовые напитки и пища,	C_m	0.145

	(-) кухонных отходов	C_w	$C_w = T_c + E_c - C_m$
X_3	(+) урина и кал	M_w	$M_w = M_m(1 + \exp\{M - X_0\})^{-1}$
Модуль обработки отходов	(+) сточно-бытовая вода	T_w	0.5
	(+) кухонные отходы	C_w	$C_w = T_c + E_c - C_m$
	(-) удобрения из отходов	W_e	$W_e = v_1 \cdot \beta_1 X_3 / (k + X_3)$

Показатели водообмена функциональных элементов в эко блоке

Устойчивое движение воды – транспирацию воды обеспечивают растения под влиянием падающего на растения потока световой энергии. Как было отмечено почти вся энергия, поступившая в систему, превращается в тепло. Тепловая энергия отводится из системы через теплообменник. В процессе теплообмена происходит конденсация воды, которая накапливается в емкости для воды.

Модуль накопления воды – ёмкость для накопления воды

Модуль накопления воды является основным распределительным узлом гидрологического цикла БСЖО. Суточный баланс воды в модуле определяется поступлением конденсатов из блоков и расходом воды на санитарно-гигиенические нужды, приготовление пищи и полив растений:

$$\frac{dX_4}{dt} = R_k \cdot \alpha \cdot \frac{X_5}{V_e} + h \cdot \alpha \cdot \frac{X_1}{V_h} - T_h - T_c - T_e, \quad (7)$$

где R_k – Воздухообмен на теплообменнике, м³/час; T_h – расход воды, на санитарно-гигиенические нужды, кг/час; T_c – расход воды, для напитков и пищи, кг/час; T_e – расход воды на полив растений, кг/час; h , V_e , V_h и α – те же, что и в формуле (2).

Атмосфера эко блока

Уравнение на динамику массы воды в атмосфере эко блока (X_5) составлено так:

$$\frac{dX_5}{dt} = R \cdot \left(\frac{X_1}{V_h} - \frac{X_5}{V_e} \right) + E_a - R_k \cdot \alpha \cdot \frac{X_1}{V_h}, \quad (8)$$

где R_k – скорость циркуляции воздуха через кондиционер (фалькон); E_a – масса транспирационной воды, поступающая от растений; h , V_e , V_h и α – те же, что и в формуле (2).

Наименование параметров воздушной среды эко блока, их величины даны в таблице 5.

Таблица 5. Параметры воздушной среды эко блока
Table 5. Parameters of the air environment of the eco unit

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Величина
Объем	V_e	м ³	200
Температура	T	°С	24
Относительная влажность		%	75
Абсолютная влажность		кг/м ³	0.0165
Воздухообмен на теплообменнике	R_k	м ³ /час	650
Воздухообмен между блоками	R	м ³ /час	60 - 90

Звено растений

Вода в растительном звене находится в составе биомассы растений, а также в субстрате. В процессе роста растений параллельно идут два процесса, поглощение воды корнями из субстрата и испарение (транспирация) воды листьями. Для расчетов по модели приняли, что за сутки с одного квадратного метра посева испаряется 5,04 кг воды. При общей посевной площади 50 м², валовая скорость испарения (E_a) составит величину 10.5 кг/час. Полагали, что, полив растений будет осуществляться раз в сутки, соответственно расход воды составит:

$$T_e = \frac{v \cdot \beta}{\left(1 + e^{(x_e - E)}\right)}, \quad (9)$$

где v – скорость подачи воды в фитотрон из емкости для воды, кг/час; β – функция регулятор, б/р; E – масса воды в звене растений, кг.

При достижении величины равной E скорость подачи воды снижается в два раза, а при её превышении падает многократно, что предотвращает, перепалив растений. Функция регулятор – β однотипна функции β_1 , но, «разрешает», подачу воды на полив

раньше (на 0,1 часа), чем включается подача влагосодержащих удобрений из модуля обработки отходов. Соответствующее выражение имеет вид:

$$\beta_1 = 1 - \frac{1}{1 + e^{\left(w - \left| \sin \frac{\pi}{24} \cdot t + 24 \right| \right) / w1}}, \quad (10)$$

где w , $w1$ и t – те же, что и в формуле (6).

Уравнение баланса воды в растительном звене составлено так:

$$\frac{dX_6}{dt} = T_e + W_e - E_c - E_a, \quad (11)$$

где E_c – скорость выноса воды из звена в составе пищи кг/час; E_a – валовая скорость испарения воды с посева растений, кг/час. W_e – то же, что и в формуле (5)

Состав потоков гидрологического цикла в эко блоке дан в таблице 6.

Таблица 6. Влагосодержащие потоки в эко блоке.

Table 6. Moisture flows in the eco-block.

Звено / элемент гидрологического цикла	Влагосодержащий поток на входе (+) и выходе (-) звена / элемента гидрологического цикла.	Обозначение потока	Скорость переноса воды с влагосодержащими потоками кг/час
X_3 Модуль обработки отходов	(+) урина и кал	M_w	$M_w = M_m(1 + \exp\{M - X_0\})^{-1}$
	(+) сточно-бытовая вода	T_w	0.5
	(+) кухонные отходы	C_w	$C_w = T_c + E_c - C_m$
	(-) удобрения из отходов	W_e	$W_e = v_1 \cdot \beta_1 X_3 / (k + X_3)$
X_4 Модуль накопления воды	(+) конденсат из фитотрона	A_k	$A_k = R_k (X_5 / V_e)$
	(+) конденсат из обитаемого модуля	H_f	$H_f = h(X_1 / V_h)$
	(-) вода на напитки и блюда	T_c	0.15
	(-) санитарно-гигиеническая вода	T_w	0.5
	(-) вода на полив растений	T_e	$T_e = v\beta(1 + \exp\{X_6 - E\})^{-1}$
X_5 Атмосфера эко блока	(+) воздух из обитаемого блока	H_a	$H_a = R(X_1 / V_h)$
	(+) испарения воды растениями	E_a	10.5
	(-) конденсат в модуль для воды	A_k	$A_k = R_k (X_5 / V_e)$
	(-) воздух в обитаемый блок	A_h	$A_h = R(X_5 / V_e)$
X_6	(+) вода на полив растений	T_e	$T_e = v\beta(1 + \exp\{X_6 - E\})^{-1}$

Звено растений	(+) жидкие удобрения из отходов	W_e	$W_e = v_1 \cdot \beta_1 X_3 / (k + X_3)$
	(-) ингредиенты пищи	E_c	0.05
	(-) испарения воды растениями	E_a	10.5

Модель круговорота воды в БСЖО

Модель круговорота воды в БСЖО представляет собой систему из семи дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_0}{dt} = C_m - M_m \cdot \frac{1}{1 + e^{(M-X_0)}} - M_h \\ \frac{dX_1}{dt} = R \cdot \left(\frac{X_5}{V_e} - \frac{X_1}{V_h} \right) + M_h - h \cdot \alpha \cdot \frac{X_1}{V_h} \\ \frac{dX_2}{dt} = T_c + E_c - C_m - C_w \\ \frac{dX_3}{dt} = M_m \cdot \frac{1}{1 + e^{(M-X_0)}} + T_w + C_w - W_e \\ \frac{dX_4}{dt} = R_k \cdot \alpha \cdot \frac{X_5}{V_e} + h \cdot \alpha \cdot \frac{X_1}{V_h} - T_h - T_c - T_e \\ \frac{dX_5}{dt} = R \cdot \left(\frac{X_1}{V_h} - \frac{X_5}{V_e} \right) + E_a - R_k \cdot \alpha \cdot \frac{X_1}{V_h} \\ \frac{dX_6}{dt} = T_e + W_e - E_c - E_a \end{array} \right. \quad (12)$$

Для расчетов по модели использовалась программа *Mathcad* 15.0 M050.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов динамики водообмена в обитаемом блоке и эко блоке, представлены в виде графиков. На рисунке 2 показаны изменения содержания обменной воды в звене человека и воды в модуле приготвление пищи. Расчеты по модели показали, что масса обменной воды человека стабилизируется на уровне 2,2 кг, а равновесная масса воды в модуле приготовления пищи - 1 кг и остается неизменной.

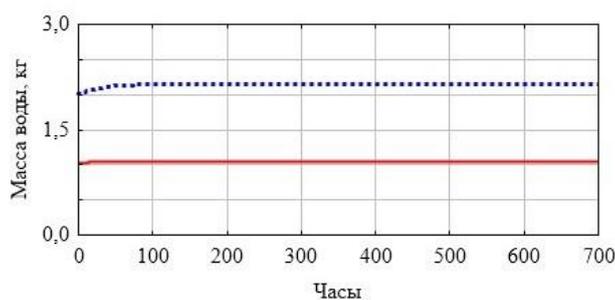


Рисунок 2. Динамика “обменной” воды человека (пунктирная линия) и в модуле приготовления пищи (сплошная линия).

Figure 2. Dynamics of human "exchange" water (dashed line) and in the cooking module (solid line).

На рисунке 3 приведена динамика воды в модуле обработки отходов.

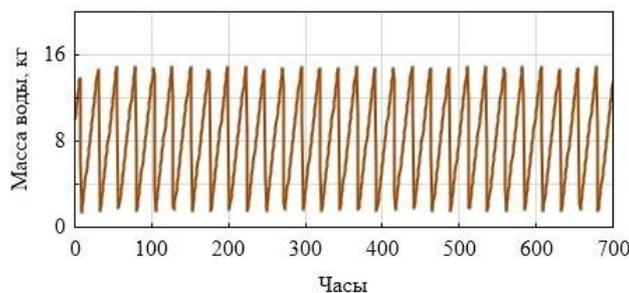


Рисунок 3. Динамика массы воды в модуле обработки отходов.

Figure 3. Dynamics of water mass in the waste treatment module.

График водообмена в модуле обработки отходов отражает накопление в течение суток санитарно-бытовой воды и влагосодержащих отходов от человека (до 15 кг) и быстрый слив под растения переработанных жидких отходов в составе поливной воды.

Расчетная динамика притока и расхода воды в модуле накопления воды и в звене растений представлена соответственно на рисунках 4 и 5.

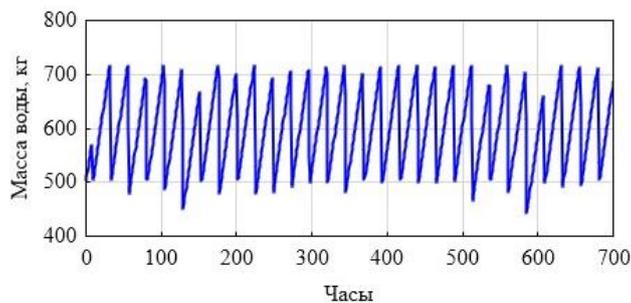


Рисунок 4. График водообмена в модуле накопления воды.

Figure 4. Water exchange graph in the water accumulation module.

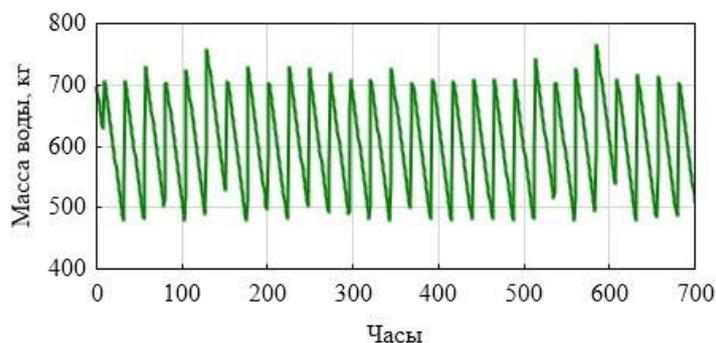


Рисунок 5. Динамика водообмена в звене растений.

Figure 5. Dynamics of water exchange in the plant link.

Вода, которая испаряется с поверхности субстрата и транспирационная вода от растений, после конденсации переходит в накопительную емкость, затем происходит полив. То есть колебания массы воды в накопительной емкости и в звене растений находятся в противофазе.

На рисунке 6 приведены расчетные уровни относительной влажности воздуха в обитаемом блоке и эко блоке. Заданное изначально высоким значения относительной влажности в эко блоке быстро стабилизировалось на уровне 76%. В обитаемом блоке уровень стабилизации относительной влажности воздуха составил 40%. Это оптимальные параметры для системы.

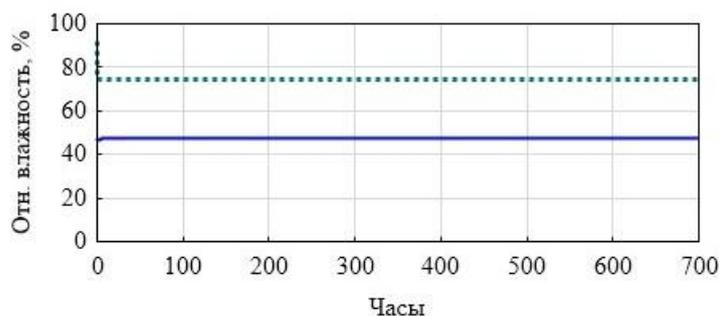


Рисунок 6. Динамика относительной влажности воздуха в эко блоке (пунктирная линия) и в обитаемом блоке (сплошная линия).

Figure 6. Dynamics of relative air humidity in the eco-block (dashed line) and in the inhabited block (solid line).

На рисунке 7 представлена диаграмма изменения относительной влажности для случая аварийного отключения кондиционера.

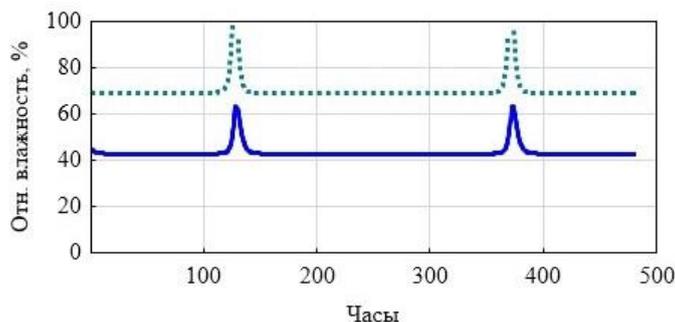


Рисунок 7. Изменения уровней относительной влажности воздуха, при периодических (4-х часовых) отключениях кондиционера, в эко блоке (пунктирная линия) и в обитаемом блоке (сплошная линия).

Figure 7: Changes in relative humidity levels during periodic (4-hour) air conditioner shutdowns, in the eco unit (dashed line) and in the habitable unit (solid line).

Согласно расчетам по модели, в случае 4-х часовых отключениях кондиционера, уровни относительной влажности воздуха поднимутся в течение одного часа до 65 % и до 100 % соответственно в обитаемом блоке и эко блоке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в работе компьютерная модель гидрологического цикла позволяет, в сжатой форме, оценить структуру и количественный вклад водообменных процессов в общий массообмен БСЖО. Не прибегая к экспериментам, с помощью модели можно изучать динамику водообмена менять параметры, корректировать и настраивать работу отдельных звеньев и модулей системы, оценивать последствия различных сбоев и аварий технологического характера. Поскольку уравнения модели составлены на основе общих представлений о характере функционирования гидрологического цикла двухзвенной БСЖО, то настройка модели с другим набором звеньев и модулей потребует более детального описания структуры и динамики водообменных процессов. Например, учёт периодического характера потребления человеком пищи и напитков, и/или взаимосвязи между изменением относительной влажности воздушной среды и интенсивностью транспирации влаги растительным ценозом, что важно для прогнозирования неблагоприятных последствий и выработки мер по их устранению при возникновении аварийных ситуаций. Всё это потребует уточнения параметров и качественного совершенствования модели и её проверки в экспериментах с БСЖО или с помощью испытательных стендов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Замкнутая система: “человек - высшие растения”. Новосибирск: Наука; 1979. 160.
- [2] Гительзон И.И., Ковров Б.Г., Лисовский Г.М., Окладников Ю.Н., Рерберг М.С., Сидько Ф.Я. и Терсков И.А. Проблемы космической биологии. Том 28. Экспериментальные экологические системы, включающие человека. М.: Наука; 1975. 312.
- [3] Gitelson J.I, Lisovsky H.M., MacElroy. Manmade Closed Ecological Systems. London: Taylor and Francis; 2003. 402.
- [4] Andre M. States of researches of crop plant cultivation in artificial systems. Contribution of the laboratory of ecophysiology: Proceedings of the workshop on artificial ecological systems. Marseille; 1990. 67-74.
- [5] Yuming Fu, Leyuan, Beizhen Xie, Chen Dong, Mingjuan Wang, Boyang Jia, Lingzhi Shao, Yingying Dong, Shengda Deng, Hui Liu, Guanghui Liu, Bojie Liu, Dawei Hu, Hong Liu. How to Establish a Bioregenerative Life-Support System for Long-Term Crewed Missions to the Moon or Mars. *Astrobiology*. 2016; 16 (12): 1-12.
- [6] Nelson M., Dempster W., Alvarez-Romo N., MacCallum T. Atmospheric dynamics and bioregenerative technologies in a soil-based ecological life support system: initial results from Biosphere 2. *Adv Space Res*. 1994; 14(11): 417-426. doi:10.1016/0273-1177(94)90331-x
- [7] Nitta K. The CEEF, closed ecosystem as a laboratory for determining the dynamics of radioactive isotopes. *Adv Space Res*. 2001; 27(9): 1505-1512. doi:10.1016/s0273-1177(01)00242-3
- [8] Rygalov V.Y., Fowler Ph.A., Wheeler R.M., Bucklin R.A. Water cycle and its management for plant habitats at reduced pressures. *Habitation*. 2004; 10: 49-59.

REFERENCES

- [1] Zamknutaya sistema: “chelovek–vysshiye rasteniya” [Closed system “human–higher plants”]. Novosibirsk: Nauka; 1979. 160 (in Russian).
- [2] Gitelson, I.I., Kovrov, B.G., Lisovsky, G.M., Okladnikov, Yu.N., Rerberg, M.S., Sidko, M.S. and Terskov, I.A. Eksperimentalnyye ekologicheskiye sistemy, vklyuchayushchie cheloveka. Problemy kosmicheskoi biologii. T. 28. [Experimental ecological systems with human. Problems of space biology V. 28]. Moscow: Nauka; 1975. 312. (in Russian)
- [3] Gitelson J.I, Lisovsky H.M., MacElroy. Manmade Closed Ecological Systems. London:

Taylor and Francis; 2003. 402.

[4] Andre M. States of researches of crop plant cultivation in artificial systems. Contribution of the laboratory of ecophysiology: Proceedings of the workshop on artificial ecological systems. Marseille;.1990. 67-74.

[5] Yuming Fu, Leyuan, Beizhen Xie, Chen Dong, Mingjuan Wang, Boyang Jia, Lingzhi Shao, Yingying Dong, Shengda Deng, Hui Liu, Guanghui Liu, Bojie Liu, Dawei Hu, and Hong Liu How to Establish a Bioregenerative Life-Support System for Long-Term Crewed Missions to the Moon or Mars. *Astrobiology*. 2016; 16 (12): 1-12.

[6] Nelson M., Dempster W., Alvarez-Romo N., MacCallum T. (1994). Atmospheric dynamics and bioregenerative technologies in a soil-based ecological life support system: initial results from Biosphere 2. *Adv Space Res.* 1994; 14(11): 417-426. doi:10.1016/0273-1177(94)90331-x

[7] Nitta K. The CEEF, closed ecosystem as a laboratory for determining the dynamics of radioactive isotopes. *Adv Space Res.* 2001; 27(9): 1505-1512. doi:10.1016/s0273-1177(01)00242-3

[8] Rygalov V.Y., Fowler Ph.A., Wheeler R.M., Bucklin R.A. Water cycle and its management for plant habitats at reduced pressures. *Habitation*. 2004; 10: 49-59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мануковский Николай Сергеевич, к.б.н.,
с.н.с., Институт биофизики СО РАН,
Красноярск, Россия
e-mail: mana49@mail.ru
ORCID: 0000-0003-2003-0058

Nikolay Manukovsky, Ph.D., Senior
Researcher, Institute of Biophysics SB RAS,
Krasnoyarsk, Russia

Саркисян Григорий Ионович,
студент, Сибирский государственный
университет науки и технологий имени
академика М.Ф. Решетнева,
Красноярск, Россия
e-mail: Grigoriikrsk@yandex.ru
ORCID: 0009-0002-7532-5718

Grigorii Sarkisyan, student,
Reshetnev Siberian State University of
Science and Technology, Krasnoyarsk,
Russia

Статья поступила в редакцию 13.06.2023; одобрена после рецензирования 22.06.2023; принята к публикации 23.06.2023.

The article was submitted 13.06.2023; approved after reviewing 22.06.2023; accepted for publication 23.06.2023.