

ГЕЛИОСИСТЕМА ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ОБИТАЕМОЙ БАЗЫ НА ПОЛЮСАХ ЛУНЫ*

Н.С. Кудрявцева, Э.Р. Садретдинова, В.А. Заговорчев

ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
д. А-80, Волоколамское ш., ГСП-3, Москва, 125993, Россия
тел.: +7 (499) 158-43-17; e-mail: nkudr@mai.ru, zagovorchev@mai.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.07-09.085-096

Заключение совета рецензентов: 06.03.19 Заключение совета экспертов: 11.03.19 Принято к публикации: 18.03.19

Использование экологически чистой солнечной тепловой энергии сталкивается с рядом трудностей при практической реализации энергосистем обитаемой лунной базы ввиду необходимости ее аккумуляции и хранения в течение лунной ночи. В статье рассматривается гелиосистема горячего водоснабжения для нужд системы обеспечения жизнедеятельности лунных баз, расположенных в пиках вечного света на Северном и Южном полюсах Луны. Данная система способна поддерживать требуемый уровень температуры воды в течение лунного года с учетом солнечных затмений на Луне. Гелиосистема включает в себя коллектор солнечной энергии в форме кольцевого цилиндра с осью, перпендикулярной поверхности Луны, с водородным теплоносителем и аккумулятором теплоты сезонного типа в форме кубического резервуара, расположенного под поверхностью Луны и заполненного дробленным реголитом. Данный аккумулятор обеспечивает поддержание температуры горячей воды в периоды отсутствия солнечного света. Проведен отбор проектных параметров и анализ работоспособности гелиосистемы на основе разработанной математической модели и компьютерного моделирования динамических режимов функционирования гелиосистемы, располагаемой на склоне кратера Пири на Северном полюсе и на склонах кратеров Шеклтон, Де Герлах и горе Малаперт на Южном полюсе Луны. Показано, что для Северного полюса температура воды на лунной базе достигает требуемого уровня в конце первой лунации и практически не изменяется в период солнечного затмения благодаря наличию в гелиосистеме аккумулятора теплоты. При расположении гелиосистемы в любом пике вечного света на Южном полюсе время выхода системы на требуемый тепловой режим не превышает 4 лунации, при этом требуемый уровень горячей воды обеспечивается в течение всего года. Отмечено, что из-за наличия интервалов темноты в южных пиках вечного света требуются значительно большие площади миделя солнечного коллектора и в два раза большие размеры теплового аккумулятора по сравнению с Северным полюсом.

Ключевые слова: гелиосистема горячего водоснабжения; обитаемая лунная база; водородный теплоноситель; полюса Луны.

THE SOLAR HOT WATER SUPPLY SYSTEM FOR AN INHABITED BASE LOCATED AT THE MOON POLES

N.S. Kudryavtseva, E.R. Sadretdinova, V.A. Zagovorchev

Moscow Aviation Institute (National Research University)
4 Volokolamskoe Sh., Moscow, 125993, Russia
tel.: +7 (499) 158 43 17, e-mail: nkudr@mai.ru, zagovorchev@mai.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.07-09.085-096

Referred 6 March 2019 Received in revised form 11 March 2019 Accepted 18 March 2019

*Кудрявцева Н.С., Садретдинова Э.Р., Заговорчев В.А. Гелиосистема горячего водоснабжения для обитаемой базы на полюсах Луны // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;07-09:85-96.



The use of the environmentally friendly solar thermal energy runs into some problems during practical realization of the power systems due to the difficulties of accumulating and storing the produced thermal energy during the lunar night. The paper deals with a solar hot water supply system for a life support system of the lunar bases located at the peaks of eternal light of the North and South Poles of the Moon and able to maintain hot water temperature during a lunar year taking into account the solar eclipses at the Moon. Solar hot water supply system includes a solar collector in the form of an annular cylinder with an axis perpendicular to the surface of the Moon with hydrogen coolant and seasonal storage heater located in lunar soil filled with crushed regolith to maintain hot water temperature during the periods without sun illumination. Design parameters as well as the system efficiency have been evaluated on the basis of the developed mathematical model and computer simulation of dynamic conditions for the system located at the ridge of Peary crater at the North Pole and the ridges of Shackleton and De Gerlache craters and Malapert Mountain at the South Pole of the Moon. It is shown that for the North Pole the water temperature at the lunar base reaches the required level at the end of the first lunation and practically does not change during the solar eclipse due to the presence of heat in the solar system. When the solar system is located in any peak of eternal light at the South Pole, the time it takes for the system to reach the required thermal regime does not exceed 4 lunations, while the required level of hot water is provided throughout the year. It is noted that due to the presence of dark intervals in the southern peaks of eternal light, significantly larger areas of the mid-solar collector and twice the size of the heat accumulator are required compared to the North Pole.

Keywords: solar hot water supply system; a manned lunar base; hydrogen coolant; the poles of the Moon.



*Наталья
Сергеевна Кудрявцева
Natalia Kudriavtseva*

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор Московского авиационного института (Национального исследовательского университета); научно-педагогический стаж более 30 лет.

Образование: Московский институт электронного машиностроения (1977 г.).

Область научных интересов: теория и практика создания систем обеспечения теплового режима и систем обеспечения жизнедеятельности космических объектов.

Публикации: более 130, в том числе 4 монографии, 5 учебных пособий.
SPIN-код: 4366-8061

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor at Moscow Aviation Institute (National Research University); more than 30 years of scientific and pedagogical experience.

Education: Moscow Institute of Electronic Machine Building, 1977.

Research interests: theory and practice of the development of the thermal management systems and life support systems for the space objects.

Publications: more than 130, including 4 monographs, 5 textbooks.



*Эльнара
Рамилевна Садретдинова
Elnara Sadretdinova*

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета); научно-педагогический стаж 9 лет.

Образование: Московский авиационный институт (2008 г.).

Область научных интересов: теория создания реактивных устройств, способных двигаться в грунтах; управление эксплуатацией ракетно-космической техники.

Публикации: 39.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor at Management of Exploitation in Rocket and Space Systems Department in Moscow Aviation Institute (National Research University); 9 years of scientific and pedagogical experience.

Education: Moscow Aviation Institute, 2008.

Research interests: theory of jet devices designing that can move in the ground; management of exploitation in rocket and space systems.

Publications: 39.



*Владимир Александрович
Заговорчев
Vladimir Zagovorchev*

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета), научно-педагогический стаж 5 лет.

Образование: Московский авиационный институт (2011 г.).

Область научных интересов: теория создания и испытания устройств, способных двигаться в грунтах с высокими скоростями; геoinформационные системы в экологии и природопользовании; системы автоматизированного проектирования.

Публикации: 27.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Assistant Professor at Management of Exploitation in Rocket and Space Systems Department in Moscow Aviation Institute (National Research University); 5 years of scientific and pedagogical experience.

Education: Moscow Aviation Institute, 2011.

Research interests: theory of designing and testing for devices that can move in the soil with the high speed; GIS in ecology and nature; computer-aided designing.

Publications: 27.

SPIN-код: 3162-3526.



1. Введение

Освоение Луны с помощью обитаемых лунных баз является первым шагом к технологиям освоения Солнечной системы и базой для создания промышленного производства из лунных сырьевых ресурсов с целью предотвращения энергетического и экологического кризисов Земли [1–4]. В основе развития лунных баз и промышленного производства на Луне лежит система энергоснабжения лунной инфраструктуры. В качестве альтернативных вариантов рассматриваются ядерная и солнечная энергетические установки для выработки электрической энергии [4–6]. Требуемую тепловую энергию планируется получать только из электроэнергии ввиду трудностей аккумулирования энергии в течение лунной ночи [1, 3, 4, 6].

В статье авторов [7] предложена гелиосистема горячего водоснабжения для системы обеспечения жизнедеятельности лунной базы в течение лунных суток с тепловым аккумулятором сезонного типа в реголите Луны. Проведены оценка проектных параметров и анализ работоспособности гелиосистемы для лунных баз, располагаемых на экваторе и средних широтах Луны.

Наряду с экваториальной и средними широтами рассматриваются возможности размещения лунной базы в полярных областях Луны [1, 8, 9]. Ось вращения Луны практически перпендикулярна плоско-

сти эклиптики, и ее полярные круги диаметром менее 50 км включают участки так называемых вечно-го дня и ночи. Дно и стенки кратеров, обращенные к полюсам, образуют участки вечной ночи, куда никогда не попадает солнечный свет. Эти участки могут содержать воду в виде льда или в связанном состоянии и метан [1, 10, 12, 13], что является важным фактором упрощения освоения региона.

Участки вечного света расположены на склонах некоторых гор и кратеров на Северном и Южном полюсах Луны и являются основными кандидатами на размещение лунных баз и установку солнечных батарей, для которых уже не понадобятся аккумуляторы энергии большой емкости. Следует отметить, что эти участки имеют малую площадь, и их количество ограничено, поэтому они могут стать объектом конкуренции между различными странами-участниками освоения Луны.

В данной статье представлена модернизированная гелиосистема горячего водоснабжения для нужд системы обеспечения жизнедеятельности лунных баз, расположенных на Северном и Южном полюсах Луны, которая способна поддерживать требуемый уровень температуры воды в течение лунного года с учетом солнечных затмений на Луне. Такой подход является новым в решении актуальной задачи обеспечения обитаемых баз на полюсах Луны экологически чистой и доступной большую часть года солнечной тепловой энергией.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
ϵ	Коэффициент излучения
δ	Толщина стенки цилиндров, м
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
A	Пик вечного света на Южном полюсе Луны, коэффициент поглощения
a	Коэффициент, определяющий конвективные и кондуктивные составляющие теплообмена
B, C, D, M	Пик вечного света на Южном полюсе Луны
b	Коэффициент, определяющий лучистый теплообмен между узлами
c	Эффективная теплоемкость узла
d	Диаметр, м
E	Внутренний диаметр внешнего цилиндра, м
F	Площадь миделя, м ²
G	Массовый расход теплоносителя, кг/с
H	Длина ребра аккумулятора теплоты, м
h	Высота коллектора солнечной энергии, м
N	Количество членов экипажа, чел.
Q	Внутренняя или внешняя тепловая нагрузка на узел, Вт
q	Удельный тепловой поток, Вт/м ²
T	Температура узла, °С
t	Время, с
v	Суточный расход горячей воды на одного человека, л/сут.чел.
<i>Индексы нижние</i>	
авых	Выход воды после нагрева в водяном теплообменнике
ат	Аккумулятор теплоты
гв	Горячая вода
гвых	Горячая вода на выходе из гелиосистемы
к	Коллектор солнечной энергии
квх	Водород на входе в коллектор солнечной энергии
квых	Водород на выходе из коллектора солнечной энергии



кст	Стенка коллектора солнечной энергии
С	Коллектор солнечной энергии
солн	Солнечный
ст1	Стенка коллекторного теплообменника
ст2	Стенка водяного теплообменника
хвх	Холодная вода на входе
Ч	Частица реголита
<i>I</i>	Номер узла
<i>J</i>	Номер узла
<i>S</i>	Солнечное излучение
<i>Аббревиатуры</i>	
АТ	Аккумулятор теплоты
в.д.	Восточная долгота
ДИЭ	Дополнительный источник энергии
з.д.	Западная долгота
КСЭ	Коллектор солнечного излучения
ТО	Теплообменник
ТО1	Коллекторный теплообменник
ТО2	Водяной теплообменник
ЭВТИ	Экранно-вакуумная теплоизоляция
ю.ш.	Южная широта

2. Освещенность на полюсах Луны

Пиками вечного света называются возвышенные участки в районе полюсов космического тела внутри Солнечной системы, которые постоянно получают солнечный свет в течение года или большее время года за исключением времени солнечных затмений [1, 11–13]. Рассмотрим освещенность таких участков у Северного и Южного полюсов Луны.

Около Северного полюса Луны существует только один пик вечного света, расположенный на склонах ближайшего к полюсу кратера Пири. В этот район постоянно попадают солнечные лучи, а на дне кратера с большой долей вероятности существует водяной лед [14].

Около Южного полюса Луны расположены шесть пиков вечного света: три участка на склонах кратера Шеклтон, один участок на склоне кратера Де Герлах и два участка на горе Малаперт. Условно назовем эти участки *A, B, C, D* и *M₁, M₂* соответственно. Однако ни один из этих участков не освещен солнцем в течение всего года. В табл. 1 для каждого пика вечного света указана суммарная освещенность участка по месяцам в течение года [15]. Все данные приведены для 2020 г. Месяц 1 соответствует середине лета, а месяц 7 – середине зимы. Отметим, что на Луне освещенность Солнцем во второй половине года примерно совпадает с освещенностью в первой половине года, а продолжительность месяца совпадает с продолжительностью лунных суток.

Таблица 1
Время освещенности (%) пиков вечного света на Южном полюсе Луны для различных месяцев года (100 % соответствует тому, что пик освещен в течение всего месяца)

Table 1
Percentage of time that each peak of eternal light is illuminated for each of the seven lunar months (100% represents that a peak is lit for the entire month)

Пик вечного света	Месяц 1	Месяц 2	Месяц 3	Месяц 4	Месяц 5	Месяц 6	Месяц 7	В среднем за 2020 г.
<i>A</i> , (89,68° ю.ш., 166° з.д.)	98	97	97	92	73	51	44	81
<i>B</i> , (89,44° ю.ш., 141,8° з.д.)	100	100	95	90	64	56	56	82
<i>C</i> , (88,71° ю.ш., 68,7° з.д.)	98	98	97	86	71	66	64	85
<i>D</i> , (88,79° ю.ш., 124,5° в.д.)	100	100	100	93	80	63	58	86
<i>M₁</i> , (86,04° ю.ш., 2,7° з.д.)	95	92	88	69	64	54	54	74
<i>M₂</i> , (86° ю.ш., 2,9° з.д.)	90	83	83	75	66	58	58	74

*Месяц 1 соответствует середине лета, месяц 7 – середине зимы.

Из табл. 1 видно, что участок *D* получает наибольшее количество солнечной энергии в течение года.

3. Теоретический анализ

3.1. Устройство гелиосистемы горячего водоснабжения для обитаемой базы на полюсах Луны

Требования к гелиосистеме будут такими же, как и к гелиосистеме горячего водоснабжения, расположенной на экваториальной и средних широтах [7]. Основными требованиями являются: простота в изготовлении и эксплуатации; возможность максимально полно использовать местные лунные ресурсы при производстве; высокий уровень надежности и безопасности в течение 15 лет. Производительность гелиосистемы должна быть рассчитана на экипаж от 3 до 20 человек с расходом потребляемой санитарно-гигиенической воды от 6 л/сут.чел до 20 л/сут.чел. в зависимости от этапа освоения Луны [1].

Этим требованиям удовлетворяет двухконтурная гелиосистема горячего водоснабжения, представлен-

ная в [7], но с отличиями, связанными с освещенностью на полюсах. На лунных полюсах Солнце никогда не поднимается высоко над горизонтом, и его лучи направлены параллельно поверхности Луны. Следовательно, поглощающую поверхность коллектора солнечной энергии следует располагать вертикально относительно поверхности планеты. Аккумулятор теплоты на полюсах будет значительно меньшего объема, но от него нельзя отказаться даже для Северного полюса из-за наличия периодов солнечного затмения.

Функциональная схема гелиосистемы горячего водоснабжения для обитаемой базы на полюсах Луны представлена на рис. 1.

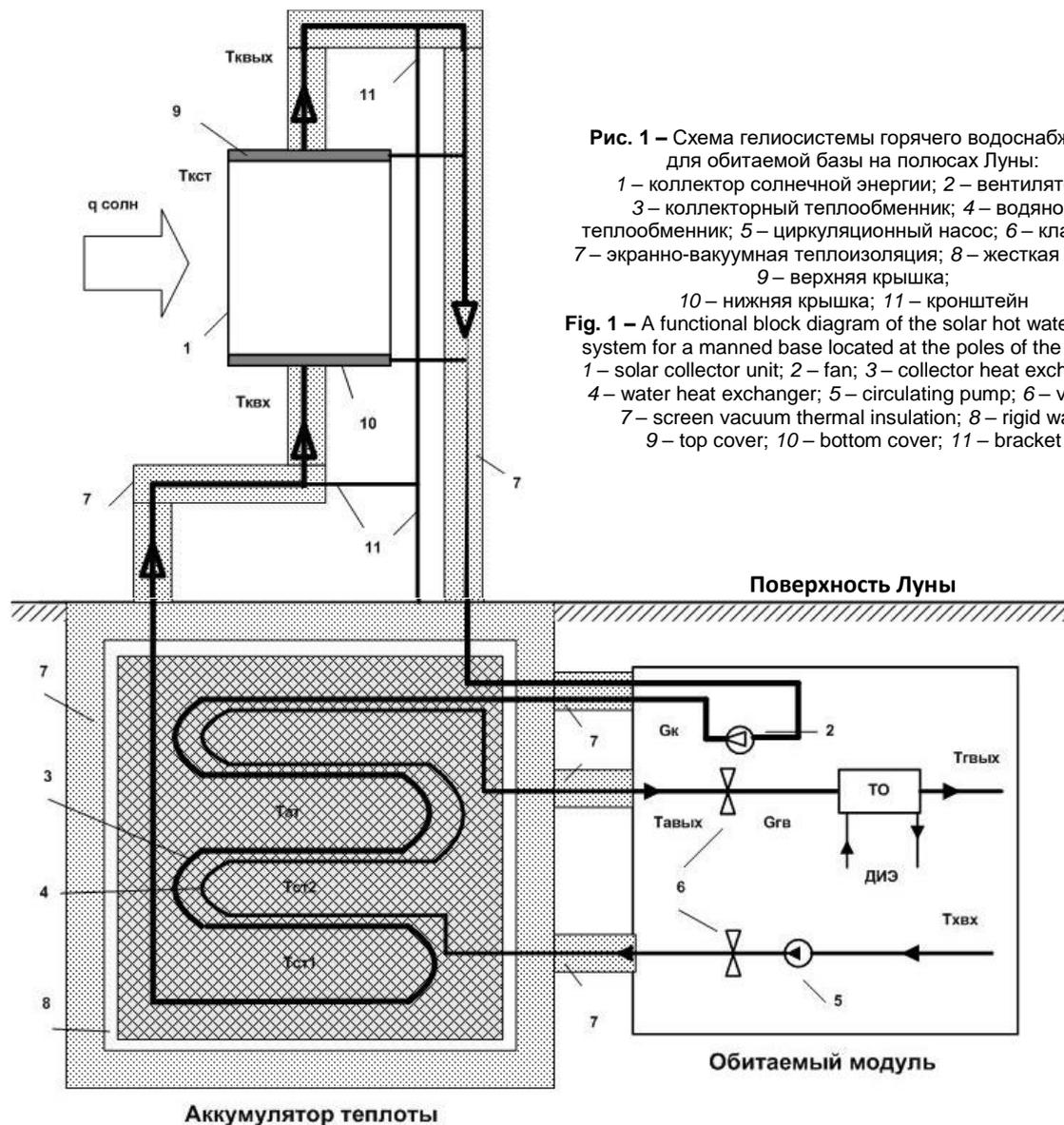


Рис. 1 – Схема гелиосистемы горячего водоснабжения для обитаемой базы на полюсах Луны:

- 1 – коллектор солнечной энергии; 2 – вентилятор;
 - 3 – коллекторный теплообменник; 4 – водяной теплообменник; 5 – циркуляционный насос; 6 – клапаны;
 - 7 – экранно-вакуумная теплоизоляция; 8 – жесткая стенка; 9 – верхняя крышка; 10 – нижняя крышка; 11 – кронштейн
- Fig. 1 – A functional block diagram of the solar hot water supply system for a manned base located at the poles of the Moon:
- 1 – solar collector unit; 2 – fan; 3 – collector heat exchanger; 4 – water heat exchanger; 5 – circulating pump; 6 – valves;
 - 7 – screen vacuum thermal insulation; 8 – rigid wall; 9 – top cover; 10 – bottom cover; 11 – bracket

Первый контур состоит из коллектора солнечной энергии (КСЭ) 1, циркуляционного вентилятора 2 и коллекторного теплообменника (ТО1) 3. Второй контур включает в себя водяной теплообменник (ТО2) 4,

циркуляционный насос 5, клапаны 6 и дополнительный электрический источник энергии (ДИЭ), при необходимости предназначенный для доведения температуры горячей воды до требуемого уровня в теп-

лообменнике (ТО); в качестве теплоносителя используется санитарно-гигиеническая вода. Вентилятор и циркуляционный насос являются самыми ненадежными элементами гелиосистемы, поэтому устанавливаются в обитаемом модуле. Передача теплоты из первого контура во второй осуществляется через аккумулятор теплоты (АТ), в который помещены ТО1 и ТО2 и который располагается в лунном грунте под поверхностью Луны и имеет жесткую стенку δ . КСЭ, АТ и трубопроводы ТО на участке между обитаемым модулем и АТ теплоизолированы с помощью экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) 7. КСЭ закрыт верхней 9 и нижней 10 крышками. КСЭ и трубопроводы с водородным теплоносителем в ЭВТИ установлены с помощью кронштейна 11.

Рассмотрим отдельно устройство коллектора солнечной энергии.

3.2. Коллектор солнечной энергии

Так же, как и в гелиосистеме [7], применяем водородный теплоноситель. Предлагается КСЭ в форме кольцевого цилиндра с осью, перпендикулярной поверхности Луны. Поперечное сечение КСЭ показано на рис. 2.

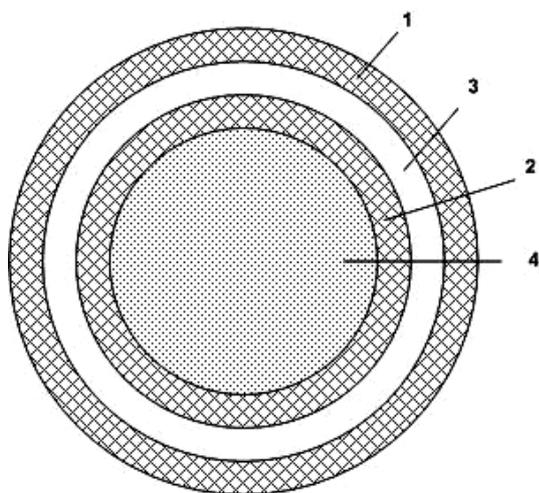


Рис. 2 – Поперечное сечение КСЭ:

1 – внешний цилиндр; 2 – внутренний цилиндр; 3 – кольцевой канал для прохода теплоносителя; 4 – ЭВТИ
Fig. 2 – Cross-sectional view of solar collector unit: 1 – outer cylinder; 2 – inner cylinder; 3 – annular channel for the passage of coolant; 4 – screen vacuum thermal insulation

Между стенками внутреннего и внешнего цилиндров 1 и 2 расположен цилиндрический канал с кольцевым поперечным сечением 3 для прохода теплоносителя. Ширина канала является его эквивалентным диаметром и не должна превышать 0,1 м для поддержания достаточно высокого значения коэффициента теплоотдачи от газа к стенкам канала. Внутри цилиндр 2 заполнен ЭВТИ 4. Достоинством такого КСЭ является то, что солнечные лучи всегда падают перпендикулярно оси цилиндра, и площадь его поглощающей поверхности, равная площади миделя, не изменяется в течение года. Площадь поглощающей по-

верхности КСЭ равна $h(E + \delta)$. Площадь излучающей поверхности КСЭ превышает площадь поглощающей поверхности в π раз и равна $\pi h(E + \delta)$.

Лучевоспринимающая поверхность изготовлена из плоского металлического листа из неполированного шероховатого алюминия. Оптические характеристики неполированного алюминия представлены коэффициентом поглощения солнечного излучения $A_s = 0,5$ и коэффициентом излучения $\epsilon = 0,055$.

Принимаем толщину стенки поверхности КСЭ равной 1,5 см из условия обеспечения защиты от метеоритного пробоя в течение 15 лет с вероятностью 0,995 [7].

3.3. Математическая модель гелиосистемы

Гелиосистема для обитаемой базы на Южном полюсе Луны в течение года функционирует при переменных солнечных тепловых потоках, соответствующих периодам освещенности Солнцем и его полного отсутствия. При функционировании гелиосистемы на Северном полюсе необходимо учесть отсутствие солнечного света в периоды солнечного затмения. В связи с этим принимается динамическая модель функционирования гелиосистемы для полюсов Луны, которая позволяет оценить перепады температуры горячей воды и учесть теплоемкость всех агрегатов и элементов системы, включая АТ. При таком подходе требуемый тепловой режим можно всегда обеспечить средствами системы с меньшими значениями массы, габаритов и энергопотребления [16–18].

Воспользуемся узловой математической моделью гелиосистемы для обитаемой базы на экваторе и средних широтах [7, 19, 20]. Гелиосистема разбивается на семь изотермических по объему узлов: теплоноситель на выходе из КСЭ, лучепоглощающая поверхность КСЭ, теплоноситель на входе в КСЭ, стенка коллекторного теплообменника, жидкость на выходе из АТ, стенка ТО2, наполнитель АТ, температуры которых постоянны в объеме узлов и изменяются во времени. Считаем, что тепловые потери через ЭВТИ 7 пренебрежимо малы. При расчете солнечной тепловой нагрузки предполагаем, что солнечные лучи падают параллельно; наклон оси вращения Луны перпендикулярен к плоскости эклиптики и, следовательно, на Луне продолжительности дня и ночи равны и нет смены времен года.

Тогда узловая математическая модель гелиосистемы представляется следующим образом:

$$c_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{i \neq j} a_{ij} (T_j - T_i) + \sum_{i \neq j} b_{ij} \left[(T_j)^4 - (T_i)^4 \right] + Q_i(t); i, j = 1, \dots, 7. \quad (1)$$

Отличия в математической модели для полюсов Луны заключаются в выражениях для коэффициентов a_{ij} , b_{ij} , c_i для КСЭ при $i = 1, 2$ [16, 20].

Погрешность расчетов по узловой математической модели не превышает 20 %, что подтверждается многолетней практикой расчета систем терморегулирования для различных космических объектов [7, 16, 18, 20].

4. Методика эксперимента

Оценка работоспособности и параметров гелиосистемы для полюсов Луны проводится с помощью вычислительных экспериментов с математической моделью (1) гелиосистемы. В программном обеспечении для ЭВМ реализован метод Рунге – Кутты четвертого порядка, что позволяет численно моделировать динамические режимы функционирования гелиосистемы при переменных солнечных тепловых потоках в течение лунного года.

Основные проектные параметры – площадь КСЭ F_k и длина ребра АТ H – определяются методом целенаправленного перебора из условия обеспечения гелиосистемой требуемого уровня температуры горячей воды в течение лунных суток и минимально возможных значений F_k и H [16, 17, 20].

В качестве исходных данных принимаются:

1. Численность экипажа от $N = 3$ до $N = 20$ человек.
2. Расход горячей воды может изменяться от $\nu = 6$ л/сут.чел. до $\nu = 20$ л/сут.чел.
3. Требуемый уровень горячей воды на выходе равен 318 К.
4. Наполнителем АТ является лунный реголит в вакууме с медианным по массе размером частиц $d_c = 60$ мкм. В статье [7] показано, что тип реголита (морской или материковый) не имеет значительного

влияния на результаты расчетов. АТ принят в форме куба с высотой H .

5. Лучепоглощающая поверхность КСЭ рассматривается в двух вариантах: неполированный шероховатый алюминий с $A_s = 0,5$, $\epsilon = 0,055$ и селективная поверхность на основе покрытия черным хромом на алюминиевой фольге с $A_s = 0,964$, $\epsilon = 0,023$.

6. ДИЭ выключен.

7. На начальный момент времени расчета все агрегаты и элементы гелиосистемы имеют температуру 253 К, примерно равную температуре реголита на глубине 1 м; температура воды на входе в систему составляет 293 К.

Для определенности следует считать, что начальный момент времени расчета совпадает с началом первого лунного месяца в соответствии с табл. 1. Результаты вычислительных экспериментов для лунной базы на Северном и Южном полюсах представлены ниже.

4.1. Северный полюс

Лунная база расположена на склонах кратера Пери, куда постоянно попадают солнечные лучи за исключением периодов солнечного затмения. Предполагаем, что полное солнечное затмение максимально возможной продолжительности, равной 3,5 часа, начинается в начале второго лунного дня при $t/T = 1$, где t – текущее время, а $T = 29,5$ сут.

Типовой динамический процесс выхода гелиосистемы на требуемый тепловой режим при $N = 20$ чел.; $\nu = 10$ л/сут.чел.; площади миделя КСЭ $F_k = 0,57$ м²; высоте аккумулятора теплоты $H = 2$ м; $A_s = 0,5$, $\epsilon = 0,055$ показан на рис. 3.

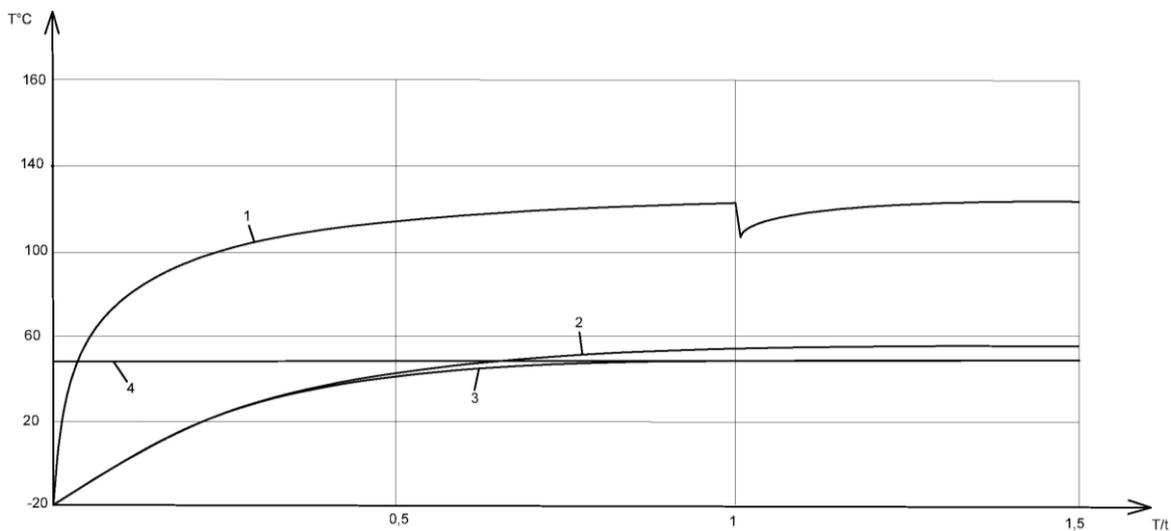


Рис. 3 – Динамический процесс функционирования гелиосистемы для лунной базы, расположенной на склоне кратера Пери на Северном полюсе, при $N = 20$ чел.; $\nu = 10$ л/сут.чел.; площади миделя КСЭ $F_k = 0,57$ м²; высоте АТ $H = 2$ м; $A_s = 0,5$, $\epsilon = 0,055$: 1 – температура водорода на выходе из КСЭ; 2 – средняя температура АТ; 3 – температура горячей воды на выходе из гелиосистемы; 4 – требуемый уровень горячей воды

Fig. 3 – Dynamic process of the solar hot water supply system operation for the lunar base located at the ridge of Peary crater at the North Pole at $N = 20$ persons, $\nu = 10$ l/day per person, $F_k = 0.57$ m², $H = 2$ m, $A_s = 0.5$, $\epsilon = 0.055$:

1 – hydrogen outlet temperature from the solar collector unit; 2 – the average temperature of the storage heater; 3 – hot water outlet temperature from the solar hot water supply system; 4 – the required level of hot water



Кривая 1 соответствует изменению температуры водорода на выходе из КСЭ, а кривая 2 – изменению средней температуры АТ, которая достигает значения 20 °С к моменту времени $t/T = 0,25$ лунаций. На рис. 3 видно, что в этот момент начинается подача воды в гелиосистему клапаном б (см. рис. 1), и далее температура воды изменяется в соответствии с кривой 3. Кроме того, видно, что температура воды немного ниже температуры АТ и достигает требуемого уровня, обозначенного прямой 4, в конце первой лунации. Влияние солнечного затмения в начале второй лунации отражается только на снижении температуры водорода на выходе из КСЭ, которая восстанавливается примерно через 63 часа. При этом температура воды в период солнечного затмения практически не изменяется благодаря наличию в гелиосистеме АТ.

Зависимости требуемой площади миделя КСЭ от расхода горячей воды v и количества членов экипажа N показаны на рис. 4, а зависимости требуемой длины ребра АТ – на рис. 5. Сплошные кривые относятся к поверхности КСЭ из неполированного алюминия с $A_s = 0,5$, $\epsilon = 0,055$, а пунктирные к селективной поверхности КСЭ с $A_s = 0,964$, $\epsilon = 0,023$.

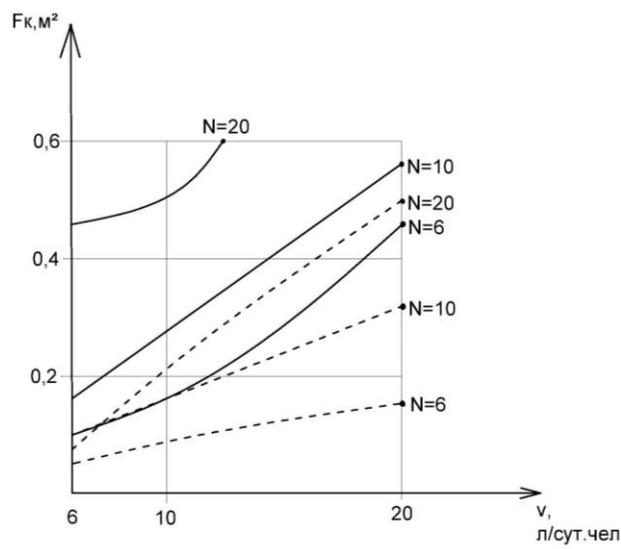


Рис. 4 – Зависимости требуемой площади миделя КСЭ от расхода горячей воды v и количества членов экипажа N лунной базы, расположенной на склоне кратера Пири на Северном полюсе, при оптических характеристиках поверхности коллектора: — — — — $A_s = 0,5$, $\epsilon = 0,055$; - - - - - $A_s = 0,964$, $\epsilon = 0,023$
Fig. 4 – Dependencies of the required midsection solar collector unit area on hot water consumption v and crew strength N for the lunar base located at the ridge of Peary crater at the North Pole having the following optical characteristics of the solar collector unit surface: — — — — $A_s=0.5$ and $\epsilon=0.055$; - - - - - $A_s=0.964$, $\epsilon=0.023$

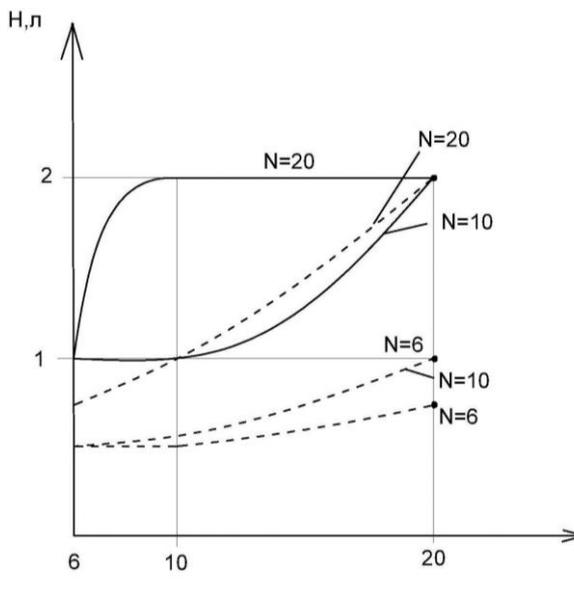


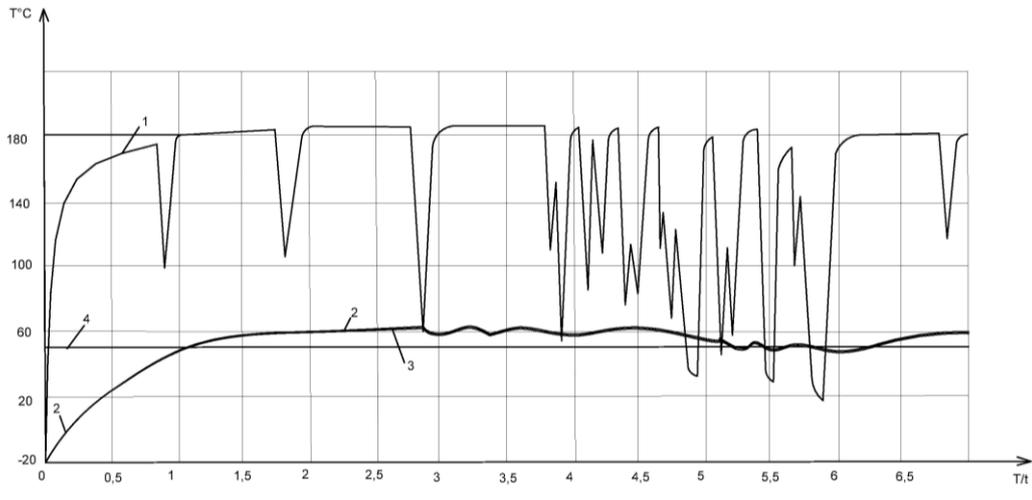
Рис. 5 – Зависимости требуемой длины ребра АТ от расхода горячей воды v и количества членов экипажа N лунной базы, расположенной на склоне кратера Пири на Северном полюсе, для всех A_s и ϵ
Fig. 5 – Dependencies of the required storage heater edge length on hot water consumption v and crew strength N for all A_s and ϵ values for the lunar base located at the ridge of Peary crater at the North Pole

Время выхода гелиосистемы на требуемый тепловой режим не превышает 1,5 лунаций для всех N , v и вариантов поверхности КСЭ.

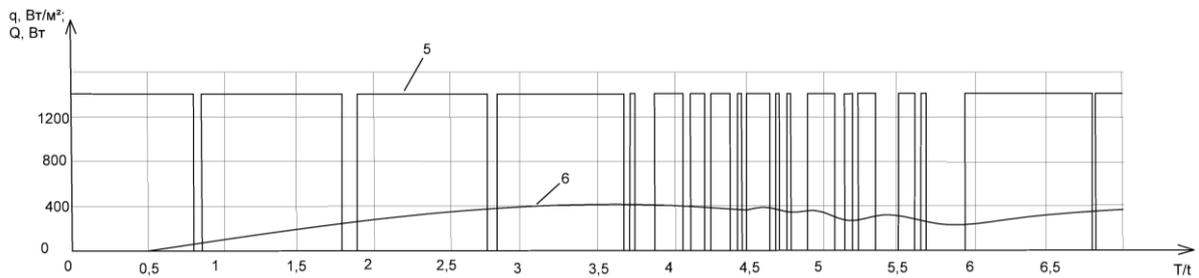
4.2. Южный полюс

Рассмотрим лунную базу, расположенную на склоне кратера Шеклтон в пике вечного света в точке А, в соответствии с табл. 1. Динамический процесс функционирования гелиосистемы в течение 7 месяцев при $N = 20$ чел.; $v = 10$ л/сут.чел.; площади миделя КСЭ $F_k = 1,7$ м²; высоте аккумулятора теплоты $H = 3$ м; $A_s = 0,5$, $\epsilon = 0,055$ показан на рис. 6.

Кривая 1 соответствует изменению температуры водорода на выходе из КСЭ, а кривая 2 – изменению средней температуры АТ, которая достигает значения 20 °С к моменту времени $t/T = 0,5$ лунаций. На рис. 6а видно, что температура воды (кривая 3) достигает требуемого уровня, обозначенного прямой 4, в начале второй лунации. На рис. 6б изображены: кривая 5 – солнечный тепловой поток $q_{солн}$, падающий на КСЭ, в соответствии с циклограммой для пика вечного света А [15] и кривая 6 – тепловая мощность Q , затрачиваемая на подогрев воды. Из графиков следует, что гелиосистема обеспечивает требуемый уровень горячей воды в течение всего года. Наиболее «тяжелым» для системы является период пятой лунации, характеризующийся частыми сменами света и темноты, что в основном влияет на площадь КСЭ, которая является избыточной для периода со второй по четвертую лунации.



a



b

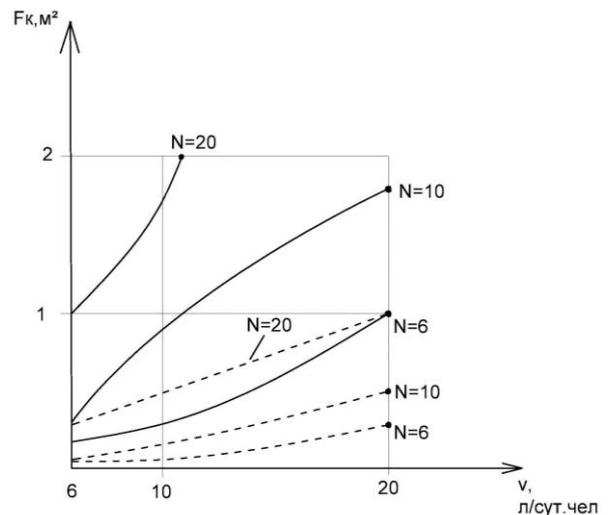
Рис. 6 – Динамический процесс функционирования гелиосистемы для лунной базы, расположенной в пике вечного света А на склоне кратера Шеклтон, при $N = 20$ чел.; $v = 10$ л/сут.чел.; площади миделя КСЭ $F_k = 1,7$ м²; высоте АТ $H = 3$ м; $A_s = 0,5$, $\epsilon = 0,055$: а – изменение параметров гелиосистемы: 1 – температура водорода на выходе из КСЭ; 2 – средняя температура АТ; 3 – температура горячей воды на выходе из гелиосистемы; 4 – требуемый уровень горячей воды; б – изменение подводимой и потребляемой тепловой мощности: 5 – солнечный тепловой поток, падающий на КСЭ; 6 – тепловая мощность, затрачиваемая на подогрев воды

Fig. 6 – Dynamic process of the solar hot water supply system operation for the lunar base located at peak of eternal light A at the ridge of Peary crater at the South Pole at $N = 20$ persons, $v = 10$ l/day per person, $F_k = 1.7$ m², $H = 3$ m, $A_s = 0.5$, $\epsilon = 0.055$: a – change of system parameters: 1 – hydrogen outlet temperature from the solar collector unit; 2 – the average temperature of the storage heater; 3 – hot water outlet temperature from the solar hot water supply system; 4 – the required level of hot water; b – change of thermal power input and thermal power spent: 5 – solar heat flux falling on solar collector unit; 6 – thermal power spent on heating water

При расположении лунной базы во всех шести пиках вечного света на Южном полюсе зависимости требуемой площади КСЭ от расхода горячей воды v и количества членов экипажа N показаны на рис. 7.

Рис. 7 – Зависимости требуемой площади миделя коллектора солнечной энергии от расхода горячей воды v и количества членов экипажа N лунной базы, расположенной в пиках вечного света на Южном полюсе, при оптических характеристиках поверхности коллектора:
 — — — — — $A_s = 0,5$, $\epsilon = 0,055$; - - - - - $A_s = 0,964$, $\epsilon = 0,023$

Fig. 7 – Dependencies of the required midsection solar collector unit area on hot water consumption v and crew strength N for the lunar base located at the peaks of eternal light at the South Pole having the following optical characteristics of the solar collector unit surface: — — — — — $A_s = 0.5$ and $\epsilon = 0.055$; - - - - - $A_s = 0.964$, $\epsilon = 0.023$



Сплошные кривые относятся к поверхности КСЭ из неполированного алюминия с $A_s = 0,5$, $\epsilon = 0,055$, а пунктирные кривые – к селективной поверхности КСЭ с $A_s = 0,964$, $\epsilon = 0,023$.

На рис. 8 приведены зависимости требуемой длины ребра АТ от v и N для обоих типов поверхности КСЭ. Габариты АТ практически не зависят от оптических характеристик поверхности КСЭ.

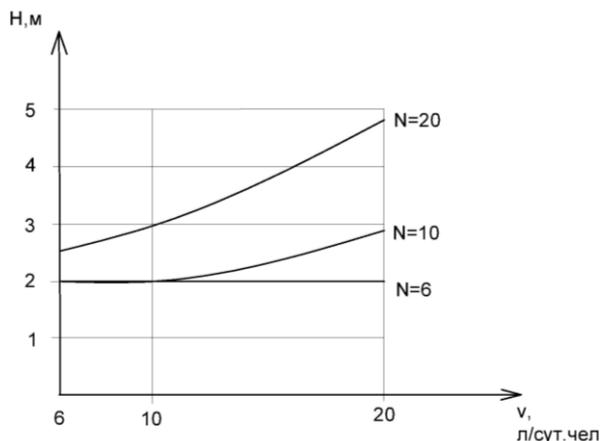


Рис. 8 – Зависимости требуемой длины ребра АТ от расхода горячей воды v и количества членов экипажа N лунной базы, расположенной в пиках вечного света на Южном полюсе, для всех A_s и ϵ

Fig. 8 – Dependencies of the required storage heater edge length on hot water consumption v and crew strength N for all A_s and ϵ values for the lunar base located at the peaks of eternal light at the South Pole

Время выхода гелиосистемы на требуемый тепловой режим не превышает 4 лунаций для всех N , v и вариантов поверхности КСЭ.

5. Результаты и их обсуждение

Как следует из проведенных авторами компьютерных вычислительных экспериментов, предлагаемая гелиосистема обеспечивает температуру горячей воды на требуемом уровне в течение лунного года при расположении лунной базы в пике вечного света на Северном полюсе и в шести пиках вечного света на Южном полюсе Луны.

Результаты расчетов, представленные на рис. 4, показали, что для лунной базы, расположенной в пике вечного света на Северном полюсе, требуемые площади миделя лучепоглощающей поверхности КСЭ составляют от $0,02 \text{ м}^2$ до $2,3 \text{ м}^2$ в зависимости от вырабатываемой тепловой энергии воды и оптических коэффициентов покрытия поверхности. Требуемые длины ребра АТ составляют от 1 м до 2 м (см. рис. 5), что соответствует требуемым объемам АТ от 1 м^3 до 8 м^3 в зависимости от конфигурации лунной базы.

Следовательно, как показано на рис. 7, для лунной базы, расположенной в пиках вечного света на Южном полюсе, требуемые площади миделя КСЭ

составляют от $0,04 \text{ м}^2$ до 30 м^2 , а требуемые длины ребра АТ – от 2 м до 5 м, что соответствует требуемым объемам АТ от 8 м^3 до 125 м^3 .

При сравнении габаритов гелиосистем для Северного и Южного полюсов видно, что для Южного полюса требуются значительно большие площади миделя КСЭ и в два раза большие размеры АТ, что объясняется наличием интервалов темноты в южных пиках вечного света в сумме продолжительностью от 14 % до 26 % за год (см. табл. 1).

5.1. Оценка затрат энергии на прокачку теплоносителей в гелиосистеме

На функционирование гелиосистемы затрачивается электроэнергия: на работу вентилятора 2 для прокачки водорода через коллекторный теплообменник и насоса 5 для прокачки воды через водяной теплообменник в период лунных суток.

Электрическая энергия в основном затрачивается на привод вентилятора. При расходе водорода $G_k = 0,000265 \text{ кг/с}$ и диаметре коллекторного трубопровода $0,04 \text{ м}$ для лунной базы с различным количеством членов экипажа и расходом воды электрическая мощность, затрачиваемая на привод вентилятора в течение лунных суток, изменяется в диапазоне от 1 Вт до 23 Вт, что не превышает 5 % от тепловой мощности, затрачиваемой на подогрев воды.

6. Заключение

Предложенная гелиосистема горячего водоснабжения для обитаемой лунной базы с членами экипажа от 3 до 20 человек и расходом воды от 6 л/сут.чел до 20 л/сут.чел обеспечивает температуру горячей воды на требуемом уровне в течение года при расположении лунной базы в пиках вечного света на Северном и Южном полюсах. При этом дополнительный источник энергии не требуется. Гелиосистема безопасна для человека, окружающей среды и удобна в эксплуатации.

Предложенный коллектор солнечной энергии – в форме кольцевого цилиндра с осью, перпендикулярной поверхности Луны. Требуемые площади миделя коллектора с водородным теплоносителем составляют от $0,02 \text{ м}^2$ до $2,3 \text{ м}^2$ для Северного полюса и от $0,04 \text{ м}^2$ до 30 м^2 для Южного полюса в зависимости от вырабатываемой тепловой энергии на подогрев воды и оптических коэффициентов покрытия поверхности.

Аккумулятор теплоты, обеспечивающий поддержание температуры горячей воды в периоды отсутствия солнечного света, представляет собой кубический резервуар в грунте Луны, заполненный дробленым реголитом в вакууме. Требуемые объемы аккумулятора теплоты в зависимости от конфигурации лунной базы составляют от 1 м^3 до 8 м^3 для Северного полюса и от 1 м^3 до 125 м^3 для Южного полюса.

Меньшие размеры аккумуляторов теплоты для гелиосистемы на полюсах Луны, по сравнению с

экваториальной и средними широтами, обуславливают более короткие трубопроводы коллекторных теплообменников. В результате затраты электрической мощности на прокачку теплоносителей в гелиосистеме различной конфигурации на полюсах Луны составляют от 2 % до 5 % от вырабатываемой тепловой мощности на подогрев воды.

Предложенная узловая математическая модель динамических режимов функционирования гелиосистемы позволяет оценить ее основные конструктивные и режимные параметры, а также целесообразность использования гелиосистемы для нужд жизнеобеспечения на обитаемой лунной базе, расположенной в пиках вечного света на Северном и Южном полюсах Луны, с различным количеством членов экипажа и расходом воды. Погрешность расчетов не превышает 20 %, что подтверждается многолетней практикой проектирования систем обеспечения теплового режима различного назначения, и может быть уменьшена путем увеличения количества узлов и уточнения параметров модели.

Список литературы

- [1] Луна – шаг к технологиям освоения Солнечной системы // Под научной ред. В.П. Легостаева и В.А. Лопоты. – М.: РКК «Энергия». 2011. – 584 с.
- [2] Семенов, Ю.П. Результаты и проблемы разработки ракетно-космической корпорации «Энергия» в области космической энергетики / Ю.П. Семенов // Известия РАН. Энергетика. – 2003. – № 5. – С. 3–20.
- [3] Шибанов, Г.П. Обитаемость космоса и безопасность пребывания в нем человека / Г.П. Шибанов. – М.: Машиностроение. 2007. – 544 с.
- [4] Грибков, А.С. Рациональный облик системы энергоснабжения обитаемой лунной базы на разных этапах ее освоения / А.С. Грибков, Р.А. Евдокимов // Известия РАН. Энергетика. – 2011. – № 3. – С. 105–116.
- [5] Dakhoul, Y.M. A conceptual design for a space-based solar water heater / Y.M. Dakhoul, R.E. Somers, R.D. Haynes // Solar Energy. – 1990. – Vol. 44. – Iss. 3. – P. 161–171.
- [6] Бескровная, И.А. / Сравнительная оценка технико-экономической эффективности использования солнечных и ядерных энергетических установок в составе лунной базы / И.А. Бескровная [и др.] // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 4(7). – С. 76–88.
- [7] Кудрявцева, Н.С. Гелиосистема горячего водоснабжения для обитаемой лунной базы / Н.С. Кудрявцева, Э.Р. Садретдинова // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 7–9. – 21–33.
- [8] Garcia, R.F. Preliminary design study for a lunar solar power station using local resources / R.F. Garcia // Solar Energy. – 2012. – Vol. 86. – Iss. 9. – P. 2871–2892.

[9] Берн, Дж.Д. Преимущества размещения лунной базы на полюсе / Дж.Д. Берн // Лунные базы и космическая деятельность в XXI веке. Под ред. В.В. Мендела. – Хьюстон, 1985. – С. 105–115.

[10] Vaniman, D. The Lunar Environment / D. Vaniman [et al.]. – In Lunar Sourcebook. Cambridge Univ. Press., 1991. – P. 27–60.

[11] LCROSS Impact Data Indicates Water on Moon [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nasa.gov/mission_pages/LCROSS/main/prelim_water_results.html – (Дата обращения: 21.10.2016).

[12] Петров, Д.В. Площадь холодных ловушек на поверхности Луны / Д.В. Петров [и др.] // Астрономический вестник. – 2003. – Т. 37. – № 4. – С. 285–291.

[13] Vasavada, A.R. Near-Surface Temperatures on Mercury and the Moon and the Stability of Polar Ice Deposits / A.R. Vasavada, D.A. Paige, S.E. Wood // Icarus. – 1999. – Vol. 141. – P. 179–193.

[14] Margot, J.L. Topography of the Lunar Poles from Radar Interferometry: A Survey of Cold Trap Location / J.L. Margot [et al.]. // Science. – 1999. – No. 284. – P. 1658–1660.

[15] Bussey, D.B.J. Illumination Conditions of the South Pole of the Moon Derived Using Kaguya Topography / D.B.J. Bussey // Icarus. – 2010. – Vol. 208. – P. 558–564.

[16] Кудрявцева, Н.С. Основы проектирования эффективных систем терморегулирования космических аппаратов / Н.С. Кудрявцева. – М.: Изд-во МАИ. 2012. – 228 с.

[17] Кудрявцева, Н.С. Оптимизация параметров гелиосистемы горячего водоснабжения / Н.С. Кудрявцева, В.В. Малоземов // Конверсия в машиностроении. – 2008. – № 1. – С. 54–55.

[18] Малоземов, В.В. Совместная оптимизация массоэнергетических характеристик системы терморегулирования космических аппаратов и приборного комплекса при обеспечении требуемой надежности / Н.С. Кудрявцева, В.В. Малоземов // Вестник МАИ. – 2009. – Т. 16. – № 1. – С. 5–14.

[19] Кудрявцева, Н.С. Космические системы жизнеобеспечения: основы обеспечения эффективности систем терморегулирования космических аппаратов / Н.С. Кудрявцева, В.В. Малоземов // Инженерная экология. – 2012. – № 2. – С. 16–36.

[20] Малоземов, В.В. Оптимизация систем терморегулирования космических аппаратов / В.В. Малоземов, Н.С. Кудрявцева. – М.: Машиностроение. 1988. – 108 с.

References

- [1] The moon - a step towards the technology of the solar system (Luna – shag k tekhnologiyam osvoeniya



Solnechnoi sistemy) // Pod nauchnoi red. V.P. Legostayeva, V.A. Lopoty. Moscow: RKK "Energiya", 2011; 584 p. (in Russ.).

[2] Semenov Yu.P. Results and problems of development of Rocket and Space Corporation "Energiya" in the field of space energy (Rezultaty i problemy razrabotok raketno-kosmicheskoi korporatsii "Energiya" v oblasti kosmicheskoi energetiki). *Izvestiya RAN. Energetika*, 2003;5:3–20 (in Russ.).

[3] Shibanov G.P. Space habitability and human security in it (Obitaemost' kosmosa i bezopasnost' prebyvaniya v nem cheloveka). Moscow: Mashinostroenie Publ., 2007; 544 p. (in Russ.).

[4] Gribkov A.S., Evdokimov R.A. Rational appearance of the energy supply system of the inhabited lunar base at different stages of its development (Ratsional'nyi oblik sistemy energosnabzheniya obitaemoi lunnoi bazy na raznykh etapakh ee osvoeniya). *Izvestiya RAN. Energetika*, 2011;3:105–116 (in Russ.).

[5] Dakhoul Y.M., Somers R.E., Haynes R.D. A conceptual design for a space-based solar water heater. *Solar Energy*, 1990;44(3):161–171.

[6] Beskrovnaya I.A., Evdokimov R.A., Kinash P.M., Kovalev I.I., Tugaenko V.Yu. Comparative evaluation of the technical and economic efficiency of the use of solar and nuclear power plants as part of the lunar base (Sravnitel'naya otsenka tekhniko-ekonomicheskoi effektivnosti ispol'zovaniya solnechnykh i yadernykh energeticheskikh ustanovok v sostave lunnoi bazy). *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2014;4(7):6–88 (in Russ.).

[7] Kudryavtseva N.S., Sadretdinova E.R. The solar hot water system for a habitable lunar base (Geliosistema goryachego vodosnabzheniya dlya obitaemoi lunnoi bazy). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2017;(7–9):21–33 (in Russ.).

[8] Garcia R.F. Preliminary design study for a lunar solar power station using local resources. *Solar Energy*, 2012;86(9):2871–2892.

[9] Bern Dzh. D. Advantages of placing the lunar base at the pole // Lunar bases and space activity in the XXI century (Preimushchestva razmeshcheniya lunnoi bazy na polyuse (Lunnye bazy i kosmicheskaya deyatel'nost' v XXI veke) Ed. V.V. Mendela. Houston, 1985; pp. 105–115 (in Russ.).

[10] Vaniman D., Reedy R., Heiken G., Olhoeft G., Mendell W. The Lunar Environment. In Lunar Sourcebook. Cambridge Univ. Press., 1991; pp. 27–60.

[11] LCROSS Impact Data Indicates Water on Moon. Available on:

http://www.nasa.gov/mission_pages/LCROSS/main/prelim_water_results.html (10.21.2016).

[12] Petrov D.V. The area of cold traps on the surface of the moon (Ploshchad' kholodnykh lovushek na poverkhnosti Luny). *Astronomicheskii vestnik*, 2003;37(4):285–291 (in Russ.).

[13] Vasavada A.R., Paige D.A., Wood S.E. Near-Surface Temperatures on Mercury and the Moon and the Stability of Polar Ice Deposits. *Icarus*, 1999;141:179–193.

[14] Margot J.L., Campbell D.D., Jurgens R.F., Slade M.A. Topography of the Lunar Poles from Radar Interferometry: A Survey of Cold Trap Location. *Science*, 1999;284:1658–1660.

[15] Bussey D.B.J., McGovern J.A., Spudis P.D., Neish C.D., Noda H., Ishihara Y., Sorensen S.A. Illumination Conditions of the South Pole of the Moon Derived Using Kaguya Topography. *Icarus*, 2010;208:558–564.

[16] Kudryavtseva N.S. Fundamentals of designing effective spacecraft thermal control systems (Osnovy proektirovaniya effektivnykh sistem termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov). Moscow: Izd-vo MAI, 2012; 228 p. (in Russ.).

[17] Kudryavtseva N.S., Malozemov V.V. Optimization of parameters of the hot water solar system (Optimizatsiya parametrov geliosistemy goryachego vodosnabzheniya). *Konversiya v mashinostroyeniye*, 2008;1:54–55 (in Russ.).

[18] Malozemov V.V., Kudryavtseva N.S. Joint optimization of mass-energy characteristics of the thermal control system of spacecraft and instrumentation complex while ensuring the required reliability (Sovmestnaya optimizatsiya massoenergeticheskikh kharakteristik sistemy termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov i pribornogo kompleksa pri obespechenii trebuemoi nadezhnosti). *Vestnik MAI*, 2009;16(1):5–14 (in Russ.).

[19] Kudryavtseva N.S., Malozemov V.V. Space support systems: the basics of ensuring the effectiveness of spacecraft thermal control systems (Kosmicheskie sistemy zhizneobespecheniya: osnovy obespecheniya effektivnosti sistem termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov). *Inzhenernaya ekologiya*, 2012;2:16–36 (in Russ.).

[20] Malozemov V.V., Kudryavtseva N.S. Optimization of spacecraft thermal control systems (Optimizatsiya sistem termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988; 108 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI

