



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-124-139
УДК 69.001.5:69.033.6:69.07

Научная статья / Research article

Некоторые аспекты исследования возможности строительства АЭС на Луне

В.В. Белов^{ID}, С.А. Сазонова^{ID}✉

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация
✉ s.sazonovaa17@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 11 апреля 2022 г.
Доработана: 15 июня 2022 г.
Принята к публикации: 18 июня 2022 г.

Ключевые слова:

концепт, архитектурно-строительное решение, стационарный, АЭС, Луна, защитный купол, строительство, этапы строительства, ядерные установки, ракетоносители, жизненный цикл

Аннотация. Вопрос освоения космического пространства является приоритетным в развитии любого крупного государства, так как, решая технологические задачи, приводит к будущему прогрессу. Очевидно, что такое освоение невозможно без устройства устойчивого источника энергии непосредственно в космическом пространстве. Материалы исследования посвящены концептуальному изучению возможности строительства стационарной АЭС на Луне. Проведен обзор открытых источников информации на наличие уже существующих или находящихся на стадии разработки ядерных энергетических установок, способных работать в «лунных условиях», а также отвечающих требованиям безопасной эксплуатации и утилизации, подобраны конкретные модели ракетоносителей тяжелого и сверхтяжелого класса (существующие и концептуальные), при помощи которых возможно транспортировать до Луны полезную нагрузку величиной от 10 т и более. На основании анализа данных о реакторных установках и сведений об условиях эксплуатации и строительства на Луне сформировано концептуальное решение «многоэтажной» ограждающей конструкции стационарной АЭС на Луне, которая выполняет роль защиты от падения космических тел, радиационных амплитудных колебаний и солнечного излучения (тепла солнечного света). Представлены основные принципиальные концепты этапов строительства, эксплуатации и утилизации, для которых показана проблематика создания, развития и утилизации ядерных установок и стационарной ограждающей конструкции АЭС в условиях отсутствия атмосферы (космического тела), существующих на данный момент и требующих исследования в течение ближайшего десятилетия.

Для цитирования

Белов В.В., Сазонова С.А. Некоторые аспекты исследования возможности строительства АЭС на Луне // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 124–139. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-124-139>

Some aspects of the possibility of building a nuclear power plant on the Moon

Vyacheslav V. Belov^{ID}, Svetlana A. Sazonova^{ID}✉

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation
✉ s.sazonovaa17@mail.ru

Article history

Received: April 11, 2022
Revised: June 15, 2022
Accepted: June 18, 2022

Abstract. The problem of space exploration is a priority in the development of any large state, because it solves the problems of future technological progress. Obviously, such development is not possible without a stable energy source directly in outer space. Materials of this work are devoted to



Keywords:

concept, architectural solution, construction solution, stationary, nuclear power plant, Moon, protective dome, construction, construction stages, nuclear installations, launch vehicles, life cycle

a conceptual study of the possibility of building a stationary nuclear power plant (NPP) on the Moon. A review of open sources of information on the availability of already existing or under development nuclear power plants capable of operating in the “Lunar environment,” as well as meeting the requirements of safe operation and future utilization, selected specific models of heavy and superheavy-class carrier rockets (existing and conceptual) with the ability to transport payloads of 10 tons or more to the Moon. Based on the analysis of data on reactor plants and information on operating and construction conditions on the Moon, a conceptual solution of “re-usable” enclosing structure of stationary NPP on the Moon, which serves as protection from falling space bodies, radiation and solar radiation, is formed. The main principal concepts of the stages of construction, operation and utilization of a stationary NPP on the Moon are presented. The problems of creation, development and utilization of stationary sources of nuclear energy in the absence of atmosphere (space), existing at the moment and requiring investigation during the nearest decade, are shown.

For citation

Belov VV, Sazonova SA. Some aspects of the possibility of building a nuclear power plant on the Moon. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):124–139. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-124-139>

Введение

Освоение космического пространства является приоритетной государственной задачей России, Китая, США, Франции, Японии¹. Однако развитие и освоение космоса невозможно без устойчивого относительно мощного источника (на поверхности космического тела) энергоснабжения и его организации непосредственно в космическом пространстве² [1]. Очевидно, что из суще-

ствующих стабильных технологий наиболее перспективна атомная энергетика³ [2–4].

С этой позиции в качестве испытательного полигона для обкатки технологий строительства АЭС может рассматриваться Луна [5]. Так, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA, США) открыло сбор предложений по созданию к 2030 г. ядерно-энергетического реактора на Луне⁴ [6; 7], а госкорпорация «Роскосмос» уже предложила проект лунной базы с мини-АЭС под названием Patron Moon⁵.

В настоящее время большинство концептов атомных решений в космосе сводится к изготовлению сосредоточенных и полнокомплектных установок [8], мощность которых весьма ограничена по ряду причин, среди которых, напри-

¹ Федеральная космическая программа России на 2016–2025 гг., утвержденная постановлением Правительства РФ от 23 марта 2016 г. № 230. URL: <https://www.roscosmos.ru/22347/> (дата обращения: 15.03.2022); Основные положения Основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (утв. Президентом РФ от 19.04.2013 г. № Пр-906). URL: <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6813088/content.html> (дата обращения: 15.03.2022); BEIJING, Jan. 28 (Xinhua) – The State Council Information Office of the People’s Republic of China published a white paper titled “China’s Space Program: A 2021 Perspective” on Friday. URL: <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6813088/content.html> (дата обращения: 15.03.2022); United States Space Priorities Framework. Washington, The White House – December 2021. URL: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/12/United-States-Space-Priorities-Framework-December-1-2021.pdf> (дата обращения: 15.03.2022); The US Space Program: What Does NASA Do? URL: <https://www.masterclass.com/articles/what-does-nasa-do#what-is-nasa> (дата обращения: 15.05.2022); The birth of the French space program. URL: <https://www.spacelegalissues.com/space-law-the-birth-of-the-french-space-program/> (дата обращения: 15.05.2022); Japan’s Space Program a fork in the road? URL: https://www.rand.org/pubs/technical_reports/TR184.html (дата обращения: 15.05.2022).

² Федеральная космическая программа России на 2016–2025 гг., утвержденная постановлением Правитель-

ства РФ от 23 марта 2016 г. № 230. URL: <https://www.roscosmos.ru/22347/> (дата обращения: 28.02.2022).

³ Основные положения Основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (утв. Президентом РФ от 19.04.2013 г. № Пр-906). URL: <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6813088/content.html> (дата обращения: 15.03.2022); *Сухарева И.* Без атомной энергии галактики не освоить. URL: https://atomicexpert.com/spacenuclear_technologies (дата обращения: 15.03.2022).

⁴ NASA открыла сбор предложений по созданию к 2030 г. ядерно-энергетического реактора на Луне. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/11/23/119652> (дата обращения: 28.02.2022).

⁵ Предприятие Роскосмоса планирует сдавать в аренду лунную базу с мини-АЭС. URL: <https://ria.ru/20191013/1559716502.html> (дата обращения 28.02.2022).

мер, полезная нагрузка, выводимая ракетопосилом. В результате подобный подход не позволяет защитить установки должным образом на местах базирования в космическом пространстве, а также наладить их эффективную будущую эксплуатацию и утилизацию. С другой стороны, освоение космоса так или иначе потребует организацию и более мощных станций за счет дополнительного возможного развертывания производств на территории иных космических тел⁶ [9–11].

Целью данной работы является исследование концептуальных возможностей строительства стационарной АЭС на Луне в качестве первичного испытательного полигона мощностью, превосходящей мощность одной комплектной установки, с учетом существующих доступных технологий.

1. Методы и материалы

Для достижения поставленной цели произведен анализ открытых источников информации для выбора наиболее приемлемых технологий по выработке тепловой и электрической энергии на атомных реакторах, из числа тех, что способны работать в лунных условиях. Аналогичный анализ выполнен для ракетопосилом, с целью определения полезной нагрузки вывода на орбиту Луны.

Конструктивное решение стационарной АЭС предложено на основании анализа и синтеза информации, полученной из открытых источников, а также с учетом логических предположений о способах создания групповой системы установок (их доставка и прилунение), сооружения защитной конструкции (путем оценки достаточности мощности рабочих приводов техники), будущей утилизации (изъятие без разрушения защитной постройки и вывод на орбиту утилизации установок, отработавших свой срок), на основании оценки вероятности падения метеоритов в пятно размещения сооружения и нагрузки от них. Полученная концепция полностью базируется на изучении и обобщении научной и научно-технической информации с некоторыми расчетными оценками, выполненными непосредственно ав-

торами. *Объект исследования* – возможность строительства стационарной АЭС на Луне с учетом существующих и разрабатываемых в настоящее время технологий. *Предмет исследования* – концептуальная оценка архитектурно-строительных решений (в первом приближении) для стационарной АЭС на Луне с учетом транспортировки основного технологического оборудования, его защиты при работе, а также дальнейшей утилизации.

2. Результаты

В качестве энергетических атомных реакторов для строительства АЭС на Луне изучены существующие и разработанные (или находящиеся в стадии разработки) установки, а именно: SNAP-10A, «Ромашка», «Бук», ERATO, «Топаз-1», «Топаз-2», «Енисей», SAFE-400, KiloPower и ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса (ЯЭДУ). Анализ применимости той или иной установки для использования ее в качестве стационарной для АЭС на Луне, выполнен на основе «концепции NASA для лунной базы с ядерной электрической установкой, включающей следующие требования: система должна работать автономно и при помощи управления человеком; ресурс установки – не менее 5 лет; требуемая электрическая единичная мощность установки – 30 кВт; масса – до 2000 кг; габариты – не должны превосходить размеры обтекателя ракетного носителя типа „Протон-М“ (высота × диаметр – 13,9×4,35 м); уровень надежности – вероятность безотказной работы в течении 5 лет должна превышать 90 % с учетом возможного метеоритного повреждения»⁷ и «Принципов, касающихся использования ядерных источников энергии в космическом пространстве», принятых Генеральной Ассамблеей ООН в 1992 г. (Резолюция 47/68 от 14.12.1992 г.)⁸, а также исходя из логических требований к внешней защите от метеоритного потока, амплитудных колебаний радиации и теплового излучения, организации теплоотвода и способа получения

⁶ Министерство энергетики и НАСА подписали меморандум о взаимопонимании. URL: <https://www.energy.gov/articles/department-energy-and-nasa-sign-memorandum-understanding> (дата обращения: 28.02.2022).

⁷ Ядерные энергетические установки прямого и машинного преобразования энергии космического и напланетного назначения. Состояние, проблемы, перспективы. URL: <https://ppt-online.org/237070> (дата обращения 15.03.2022).

⁸ Принципы, касающиеся использования ядерных источников энергии в космическом пространстве. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/outer-space_nucpower.shtml (дата обращения: 15.03.2022).

энергии, возможной будущей утилизации самих установок.

Установлено, что наилучшим образом требованиям NASA соответствуют следующие установки: «Енисей» (Россия, год начала разработки – 1992 г. [12]); SAFE-400 (Safe Affordable Fission Engine, США, год начала разработки – 2002 г.) [13]; KiloPower (США, год начала разработки – 2015 г.)⁹. Оценка в части соответствия требованиям «Резолюции 47/68» от 14.12.1992 г. возможна только для установок SNAP-10A (США, 1965 г.) [14]; «Ромашка» (СССР, 1964 г.) [12]; «Бук» (СССР, 1969 г.)¹⁰; «Топаз-1» (СССР, 1987 г.) [15]; «Енисей» (Россия, 1992 г.) [12] и ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса (ЯЭДУ) (Россия, 2016 г.)¹¹. Перечисленные установки, за исключением SNAP-10A [14], соответствуют требованиям «Резолюции 47/68», так как имеют возможность автоматического управления, могут быть выведены на орбиту захоронения, а также утилизированы по истечению срока эксплуатации. Подобная оценка остальных установок невозможна в силу отсутствия необходимой информации о них в открытых источниках.

Следует отметить, что рассмотренные установки не имеют защиты от падения космических тел и дополнительной радиационной защиты от внешних амплитудных возмущений, следовательно, существует прямая необходимость в организации такой защиты.

Исходя из основного принципа действия ядерных энергетических установок и способов получения электрической энергии, можно выделить установки, использующие при выработке электрической энергии теплоноситель, например эвтектичный натрий-калиевый сплав (NaK), такие как SNAP-10A [14], «Бук», «Топаз-1» [15], «Енисей» [12]). К установкам, выработка электрической энергии в которых происходит «контактным» образом за счет термоэлектрических генераторов (в частности, на основе высокотемператур-

ных полупроводников из кремний-германиевого сплава), при этом непреобразованная в электрическую энергию часть тепла отводится ребрами-излучателями, и частичным задействованием для «контактного поджима» элементов гелия, можно отнести «Ромашку» (рассматривалась в СССР в качестве стационарного реактора на Луне) [12]. SAFE-400 [13] и ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса используют газовую смесь гелия и ксенона в качестве теплоносителя, а KiloPower использует натриевый теплоноситель.

По своему принципу действия установки делятся на реакторы, работающие: 1) на «тепловых» («медленных») нейтронах – SNAP-10A [14], «Топаз-1» [15], KiloPower; 2) «быстрых» нейтронах – «Ромашка» [12], «Бук», SAFE-400 [13], ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса; 3) «промежуточных» нейтронах – «Енисей» [12].

Отдельно стоит выделить систему ERATO (Франция, 1980-е гг.), включающую три различные силовые установки: реактор на «быстрых» нейтронах с натриевым теплоносителем и топливом из оксида урана, работающий при температуре около 670 °С; высокотемпературный реактор с газовым охлаждением (с «тепловым» или «надтепловым» спектром нейтронов), работающий при температуре около 840 °С; реактор на «быстрых» нейтронах без литиевого охлаждения, работающий при температуре 1150 °С¹².

По мощности установки делятся на маломощные – до 1 кВт (SNAP-10A [14], «Ромашка», однако для нее предложена конструктивная модернизация с повышением мощности до 3–5 кВт); средней мощности – от 3–7 кВт («Бук», «Топаз-1», «Енисей»); мощные – от 7 кВт и выше (KiloPower, ERATO, SAFE-400 и ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса). Масса-габаритные характеристики, для рассматриваемых установок позволяют их классифицировать следующим образом: малогабаритные – с массой до 1000 кг и длиной установки до 2 м (SNAP-10A [14], «Ромашка» [12], «Бук», KiloPower, SAFE-400 [13]); среднегабаритные – массой от 1 000 до 2 000 кг

⁹ NASA успешно испытало ядерный реактор для лунной базы. URL: <https://nplus1.ru/turbopages.org/nplus1.ru/s/news/2018/05/02/kilopowertes> (дата обращения: 28.02.2022).

¹⁰ Бук (ядерная энергетическая установка). URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бук_\(ядерная_энергетическая_установка\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бук_(ядерная_энергетическая_установка)) (дата обращения: 28.02.2022).

¹¹ Ядерные энергетические установки прямого и машинного преобразования энергии космического и напланетного назначения. Состояние, проблемы, перспективы. URL: <https://ppt-online.org/237070> (дата обращения 15.03.2022).

¹² Nuclear reactors and radioisotopes for space (updated May 2021)». URL: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-reactors-for-space.aspx#:~:text=Radioisotope%20power%20sources%20have%20been,source%20for%20deep%20space%20missions> (дата обращения: 15.03.2022).

и длиной от 2 до 5 м («Топаз-1» [15], «Енисей» [12]); крупногабаритные – массой свыше 2 000 кг и длиной более 5 м (ERATO¹³, ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса, при этом стоит отметить, что длина (высота) ЯЭДУ составляет – 53,4 м). По планируемому сроку службы: до 1 года – SNAP-10A [14], «Бук», ERATO, «Топаз-1» [15]; до 2 лет – «Ромашка» (подтвержденный испытаниями ресурс – 15 000 ч) [12]; до 5,5 лет – «Енисей» [12]; до 10 лет – SAFE-400 [13], KiloPower, ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса.

На основании выполненного анализа наиболее перспективными из существующих на данный момент ядерных установок для использования в условиях Луны в качестве стационарной АЭС являются установки с реакторами на быстрых нейтронах, использующими газовые теплоносители и «контактные» способы выработки на полупроводниках (такие как «Ромашка», SAFE-400 и т. д.). Следует отметить, что одним из преимуществ «Ромашки» является работоспособность реактора при температуре ядра до 1900 °C [12]. В качестве преобразователей электрической энергии эффективны термоэлектрические генераторы, так как они основаны на прямом преобразовании тепловой энергии в электрическую с использованием полупроводниковых элементов или двигателей Стирлинга. Ввиду того, что все рассмотренные установки обладают малой единичной мощностью относительно экономических требований NASA и отсутствует какая-либо информации о проверке надежности их работы в условиях падения космических камней и метеоритов, предполагается групповое размещение установок. Технология получения электрической энергии с использованием термоэлектрических генераторов и двигателей Стирлинга позволяет осуществить такое групповое размещение с реализацией единой внешней защиты от падения метеоритов, космических камней, а также радиационной защиты от амплитудных возмущений в космиче-

ском пространстве, что гарантирует работоспособность и надежность работы АЭС в условиях Луны.

В качестве дальнейшего рассмотрения типов ракетоносителей и конструкции внешней защиты для ядерной установки, реализованной в самостоятельном полетном модуле, приняты следующие средние масса-габаритные характеристики: масса – до 1200 кг (2000 кг), длина – около 4900 мм, максимальный диаметр – 1800 мм. Единичная мощность установок принята в 5 кВт с гарантированным сроком эксплуатации 5 лет. Мощность и средний срок эксплуатации модулей принят на основании анализа существующих ядерных энергетических установок. Полетный модуль также должен включать в себя блок инверторов (преобразователей), баки с запасом топлива, блок двигателей, а также шасси для самостоятельного передвижения по поверхности Луны.

В таблице приводится анализ основных существующих (и концептуальных) грузовых ракетоносителей достаточной мощности для транспортировки грузов (строительных узлов) и техники (роботов) на Луну для возведения стационарной АЭС. Исходя из массогабаритных характеристик реакторных установок наиболее подходящим грузовым ракетоносителем будет ракета «Энергия» (СССР), из зарубежных аналогов – ракетоноситель тяжелого класса «Сатурн-5» (США).

Учитывая грузоподъемность существующих ракетоносителей (см. таблицу), а также особенности выбранной ЯЭУ, предложена концептуальная конструкция стационарной АЭС, которая в свою очередь базируется на геометрических параметрах принятых выше модулей, необходимости в защите установок и отвода тепла от них в процессе работы, возможностях возведения в условиях Луны существующими технологиями (планируемыми в ближайшей перспективе), предельной мощности используемой техники (в частности, луноходов). Так, в первом приближении принято объемно-планировочное решение купольной конструкции с высотной отметкой над поверхностью планировки +8,500 м, общим диаметром 23,2 м, при количестве размещаемых в одной конструкции установок до 12 шт. (общая мощность – 60 кВт, с двойным резервированием относительно требований NASA).

¹³ Nuclear reactors and radioisotopes for space (updated May 2021)». URL: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-reactors-for-space.aspx#:~:text=Radioisotope%20power%20sources%20have%20been,source%20for%20deep%20space%20missions> (дата обращения: 15.03.2022).

Анализ существующих и разрабатываемых грузовых ракетносителей, способных доставить грузы на Луну¹⁴

№	Название	Состояние	Масса полезной нагрузки, перемещаемой до траектории на Луну, т	Космодром
1	«Сатурн-5»	Последний запуск был в 1973 г.	43,5	Стартовый комплекс LC-39, Космический центр имени Джона Ф. Кеннеди (КЦ Кеннеди)
2	«Энергия»	Последний запуск был в 1988 г.	32	Байконур
3	SpaceX Starship	В разработке, 2024 г.	50	SpaceX LC, Техас LC-39A, LC-49
4	Falcon Heavy	Последний запуск был в 2019 г.	16,8	LC-39A, КЦ Кеннеди SLC-4E, Ванденберг
5	Falcon 9	Последний запуск был 25 февраля 2022 г.	4	SLC-40, мыс Канаверал SLC-4E, Ванденберг LC-39A, КЦ Кеннеди
6	H1	Все запуски были неудачными	5,56	Байконур
7	«Енисей» 2028	В разработке, 2028 г.	27	Восточный
8	Launch System Space	В разработке, 2022 г.	45	LC-39, КЦ Кеннеди
9	«Чанчжэн-9»	На стадии проектирования	50	–
10	«Дон»	На стадии проектирования	32	Восточный
11	«Вулкан»	Был в разработке до 1987 г.	43	Байконур
12	«Протон М»	Последний запуск был 13 декабря 2021 г.	5,7	Байконур

Analysis of existing and developing rocket systems that can deliver cargoes to the Moon¹⁵

No.	Name	Status	Weight of payload moved to the track to the Moon, t	Cosmodrome
1	"Saturn-5"	The last start was in 1973	43.5	Launch Complex 39 (LC-39), The John F. Kennedy Space Center
2	"Energiya"	The last start was in 1988	32	Baikonur
3	SpaceX Starship	In the works, 2024	50	SpaceX LC, Texas LC-39A, LC-49
4	Falcon Heavy	The last start was in 2019	16.8	LC-39A, The John F. Kennedy Space Center SLC-4E, Vandenberg Space Force Base
5	Falcon 9	The last startup was on February 25, 2022	4	SLC-40, Cape Canaveral SLC-4E, Vandenberg Space Force Base LC-39A, The John F. Kennedy Space Center
6	H1	All the starts were unsuccessful	5.56	Baikonur
7	"Enisej"	In the works, 2028	27	Vostochny
8	Launch System Space	In the works, 2022	45	LC-39, The John F. Kennedy Space Center
9	"Chanchzhen-9"	In the design stage	50	–
10	"Don"	In the design stage	32	Vostochny
11	"Vulkan"	Was in development until 1987	43	Baikonur
12	"Proton M"	The last startup was on December 13, 2021	5.7	Baikonur

¹⁴ Ракеты-носители. URL: <https://www.roscosmos.ru/33/> (дата обращения: 28.02.2022); Перспективный ряд ракет-носителей. URL: <http://www.buran.ru/hm/38-3.htm> (дата обращения 28.02.2022).

¹⁵ Booster rocket. Available from: <https://www.roscosmos.ru/33/> (accessed: 28.02.2022); Perspective range of booster rockets. Available from: <http://www.buran.ru/hm/38-3.htm> (accessed: 28.02.2022).

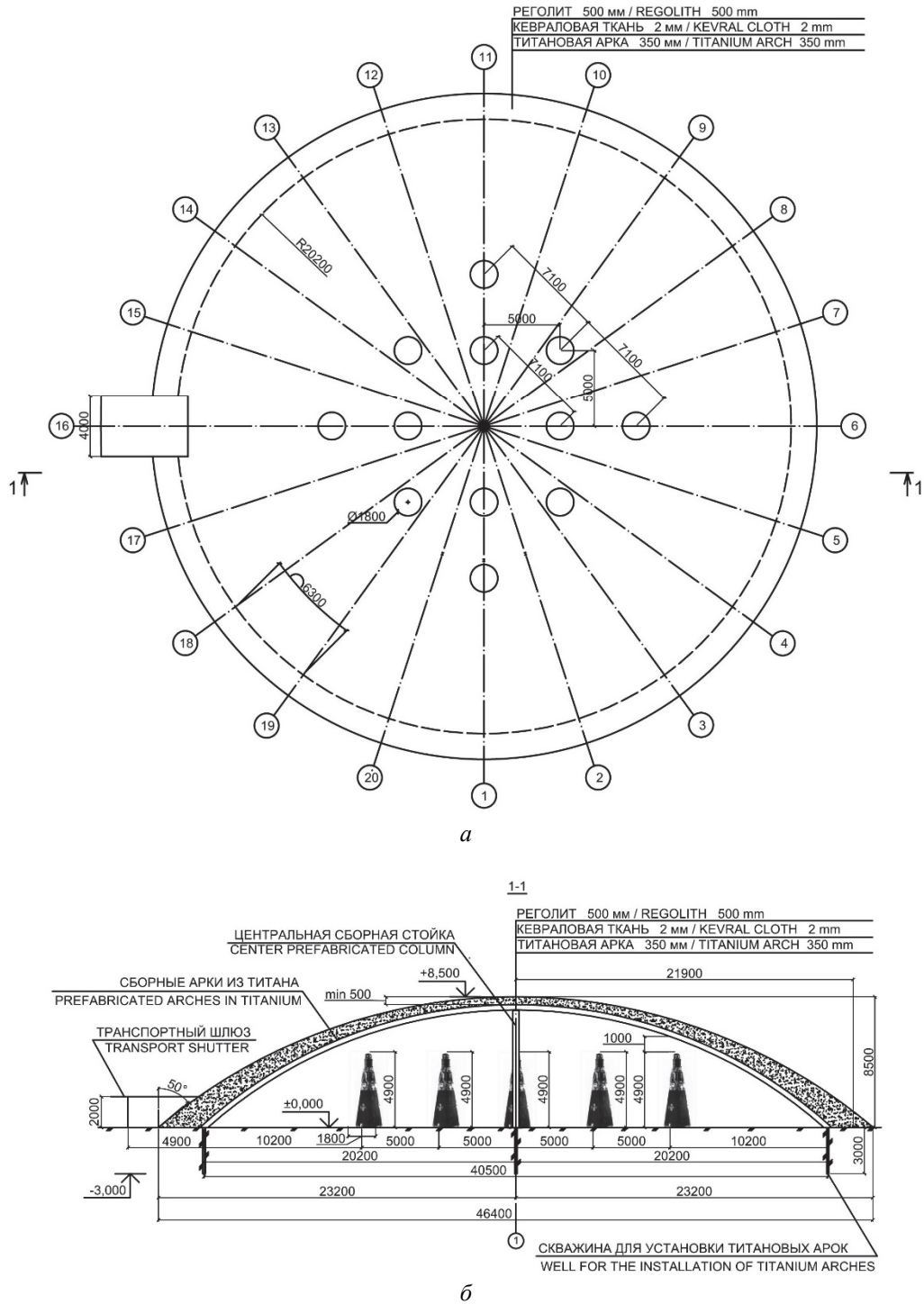


Рис. 1. Ограждающая защитная конструкция АЭС для установки на Лунной поверхности (диаметр скважин принят равным 160–170 мм, глубина – 3000 мм):

Figure 1. Enclosing protective structure of the nuclear power plant for installation on the Lunar surface (the diameter of the boreholes is taken equal to 160–170 mm, depth – 3000 mm):
 а – план; б – продольный разрез¹⁶

¹⁶ Бурение на Луне. URL: <http://byrim.com/burenie/13.html> (дата обращения: 28.02.2022).

¹⁷ Moon drilling. Available from: <http://byrim.com/burenie/13.html> (accessed: 28.02.2022).

Количество объединяемых в группу ЯЭУ зависит от безопасности совместной работы, потребности в мощности (электрической энергии) для их потребителей. Расстояние между установками принято из условий их безопасной эксплуатации, а также транспортных перемещений и равно – 3 м. Купол оснащается транспортным шлюзом диаметром 2 м, который служит для многоразового использования самого сооружения при условии эксплуатационной замены оборудования. В качестве ограждающей конструкции используется покрытие из кевларовых нитей (или ткани на основе этих нитей), хорошо воспринимающих динамические нагрузки, которое можно возвести в условиях Луны, и насыпь местного грунта – реголита, являющегося защитой от космической радиации и тепловых перепадов [16–19]. Несущая конструкция выполняется в виде арок из титана с центральной поддерживающей стойкой (круглого сечения диаметром 150 мм¹⁸, рис. 1). Основным параметром, на котором основываются геометрические размеры купола, является верхняя отметка над уровнем дневной поверхности Луны, которая в первую очередь определяется принятой геометрией реакторных электрических модулей, а также возможностями луноходов при возведении АЭС (их необходимой мощности). Жесткая конструкция несущих элементов купола обусловлена необходимостью многоразового использования, снижением зависимости от амплитудных температурных колебаний и внешних деформаций поверхности Луны [16]. Отвод избытка тепла при выработке энергии предусматривается частичным радиационным поглощением самим реголитом [20; 21].

Риск падения космических тел на купол стационарной АЭС радиусом 23,2 м оценен из расчета среднего количества камней, падающих на поверхность Луны за сутки, а нагрузка от них – исходя из средней массы одного камня и его приближенной скорости столкновения. Так, масса космических камней, падающих на Луну в сутки, составляет 2700 кг¹⁹; количество космических камней, падающих на Луну в сутки, – 100 000 шт.²⁰;

средняя масса одного космического камня, падающего на Луну в сутки, может быть определена из отношения массы всех камней, падающих за сутки, к их количеству и составит 0,027 кг/сут. Площадь поверхности Луны²¹ – $3,793 \cdot 10^{13}$ м². Разделив количество камней, падающих на ее поверхность в сутки, можно получить количество космических камней, падающих на единицу площади поверхности Луны, которое составляет в сутки $2,64 \cdot 10^{-9}$ шт./м²·сут). Площадь поверхности защитного купола радиусом 23,2 м и высотой 8,5 м равна 1602,21 м². Следовательно, вероятность падения одного космического камня в сутки на единицу площади купола будет определяться произведением площади поверхности купола на количество падающих космических камней в единицу площади и времени и составит $4,23 \cdot 10^{-6}$ (м²·сут). Исходя из этого, количество космических камней, которые упадут в течение всего срока эксплуатации группы ядерных установок при расчетном сроке в 5 лет, составит $7,72 \cdot 10^{-3}$ шт./м²·ср. эксл.). Согласно «Рекомендациям по применению принципов и способов противоаварийной защиты в проектах строительства»²², события с вероятностью выше $1 \cdot 10^{-3}$ (событий/год) относятся «к области недопустимого риска, требующего обязательного выполнения мер по его снижению, невзирая на размер финансовых затрат»²³; следовательно, необходимо принять меры по снижению рисков падения космических камней, а значит – предусмотреть внешнюю защиту установок. Средняя масса космических камней, падающих на Луну в сутки, а единицу площади составит $7,12 \cdot 10^{-16}$ кг. Умножив это значение на площадь поверхности купола, можно получить среднюю массу этих тел, которая будет приходиться на площадь защитного купола в сутки – $1,14 \cdot 10^{-13}$ кг. Средняя скорость падения камней составляет 25 000 м/с²⁴; следовательно, сила, с которой падают космические камни в единицу времени на единицу площади, составляет 675 Н/с.

²¹ Луна. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Луна> (дата обращения: 28.02.2022).

²² Рекомендации по применению принципов и способов противоаварийной защиты в проектах строительства. Методические подходы. М.: Москомархитектура, 2004.

²³ Там же.

²⁴ Луна.

URL: <http://selena.sai.msu.ru/Home/SolarSystem/moon/moon.htm> (дата обращения: 28.02.2022).

¹⁸ Бурение на Луне. URL: <http://byrim.com/burenie/13.html> (дата обращения: 28.02.2022).

¹⁹ Луна. URL: <http://selena.sai.msu.ru/Home/SolarSystem/moon/moon.htm> (дата обращения: 28.02.2022).

²⁰ Там же.

Таким образом, квазистатическая нагрузка от падающего камня будет определяться по формуле

$$P = FK_{\text{дин}}, \quad (1)$$

где F – средняя сила, с которой падают космические камни в единицу времени на единицу площади защитного купола (определена выше), кН; $K_{\text{дин}}$ – коэффициент динамичности, равный 1,4.

Для оценки в первом приближении защитных свойств кевлара сравним расчетное сопротивление растяжению кевлара с силой от падающих космических камней и весом реголитной засыпки:

$$R_{\text{кевлара}} > P/A + \rho t \operatorname{tg} \theta_0, \quad (2)$$

где $R_{\text{кевлара}}$ – расчетное сопротивление растяжению кевлара, принято равным 3250 МПа²⁵; P – квазистатическая нагрузка от падающего камня, определяемая по (1) и равная 945 Н/с; A – приведенная площадь, на которой распределена нагрузка P , при условии выполненной защиты из реголита, м², при среднем угле внутреннего трения реголита в 17,5° [17] составит 0,46 м² (рис. 2); ρ – плотность реголита, принята равной²⁶ 3000 кг/м³; t – толщина слоя реголита, м (рис. 1); g – ускорение свободного падения, на Луне составляет 1,62 Н/кг; $\operatorname{tg} \theta_0$ – тангенс угла наклона плоскости скольжения к вертикали, равный 0,73.

В данной работе толщина реголита принята на основании обзора существующих исследований и равна 500 мм [17; 16]. Следует учесть, что на толщину защитного слоя реголита будут влиять радиационно-физические условия эксплуатации ЯУ и ее теплотехнические характеристики. Кроме того, нужно учитывать снижение прочности вследствие старения кевлара, а также возможное снижение прочности, связанное с «распуханием» (изменением структуры нитей) и температурными метаморфозами, что учтено в снижении конечной прочности нитей на 2/3. Выполнив расчет по (1), получим, что прочность кевлара будет вполне обеспечена от площадной

нагрузки, так как предполагается, что на ткань из кевлара будет приходиться распределенная нагрузка за счет распределения верхним слоем реголита.

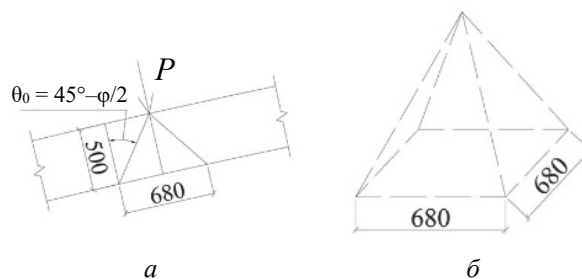


Рис. 2. Схема приложения нагрузки (а):
 P – квазистатическая нагрузка от падающего камня, Н;
 θ_0 – угол наклона плоскости скольжения к вертикали;
 φ – угол внутреннего трения, для реголита равный 17,5°;
 изометрическая проекция распределения нагрузки (б)
 (условно принято приложение нагрузки под углом 90°)
Figure 2. Scheme of the load application (а):
 P – quasi-static load from the falling stone, N;
 θ_0 – angle of inclination of the sliding plane to the vertical;
 φ – angle of internal friction, for regolith equal to 17.5°;
 isometric projection of load distribution (б)
 (the load is conventionally applied at an angle of 90°)

Вероятность падения астероидов массой 30 г составляет 6,14·10⁻¹⁰ шт./((м²·год) или 3,07·10⁻⁹ шт./((м²·ср. экслп.)²⁷, что меньше значения 5·10⁻⁵ событий/год, а следовательно, не требуется предусмотрения дополнительных мероприятий по снижению этих рисков²⁸.

Для строительства рассматриваемой конструкции внешней защиты АЭС на Луне предлагается использование следующих видов строительной техники, которой будут оснащены луноходы: шнек – для покрытия конструкции слоем реголита (заметим, что реголит, несмотря на «рыхлость» обладает высокой связностью частиц, то есть способен налипать частицами друг к другу [20; 22]); буровая установка для закрепления опор конструкций купола в лунном грунте²⁹; роботизированная установка по сборке полуарок и цен-

²⁷ Сколько метеороидов тяжелее 30 граммов падает на Луну ежегодно? URL: http://stp.cosmos.ru/index.php?id=1137&tx_ttnews%5Btt_news%5D=6174&cHash=7a1e9dc7460e19c8e84cd84073c3d841 (дата обращения: 28.02.2022).

²⁸ Рекомендации по применению принципов и способов противоаварийной защиты в проектах строительства. Методические подходы. М.: Москомархитектура, 2004.

²⁹ Бурение разведочных скважин на луне / Lunar drilling rig. URL: <http://geofpro.com/space-drilling.html> (дата обращения: 28.02.2022).

²⁵ Supercoiling. Эволюция сетчатых конструкций. Spiral technology. 2008. URL: <http://drop-shukhov.blogspot.com/2008/06/> (дата обращения: 28.02.2022).

²⁶ Луна, лунный грунт и химический состав лунных пород. URL: <http://www.ppra.ru/additional/12zem/geographic-shell-7414.php> (дата обращения: 28.02.2022).

тральной стойки каркаса на отметке планировки (на фланцевом стыке) [23]; грузоподъемный механизм для установки арок и центральной стойки каркаса в проектное положение; механизм для наматывания нитей кевлара между несущими конструкциями.

Произведем оценку мощности, достаточной для подъема лунного грунта на высотную отметку +8,500 м. Примем операционную неснижаемую мощность на основе аналога, а именно советского «Лунохода-1», в котором вырабатываемая мощность равнялась 150–170 Вт³⁰ и ее хватало на передвижение аппарата и работу систем связи. Нарращивание мощности на рабочие операции предлагается осуществлять дополнительно³¹ за счет радиоизотопных источников энергии [24], эта мощность и будет расходоваться на возведение каркаса и ограждающей конструкции защитного купола. Производительность такой установки для шнекового оборудования может быть приблизительно оценена по формуле

$$N = \frac{\rho g Q H}{\eta}, \quad (3)$$

где N – мощность шнекового насоса, принята равной 300 Вт в первой итерации (на основе сведений о существующем марсоходе Perseverance); ρ – плотность реголита, принята равной³² 3000 кг/м³; g – ускорение свободного падения на Луне, составляет 1,62 м/с²; Q – производительность подачи грунта, м³/ч; H – максимальная высота подачи

грунта, м; η – коэффициент полезного действия установки, принят равным 0,9³³.

Из (2) получаем производительность подачи грунта шнеком, которая составит 23,53 м³/ч (при мощности в 300 Вт). При снижении мощности на каждый 1 Вт производительность будет падать на 0,08 м³/г.

Так как в нормальных условиях предел упругости титановых сплавов близок к кевлару – 1050 МПа³⁴ (однако следует учитывать снижение прочности вследствие старения кевлара, а также возможное снижение прочности, связанное с «распуханием» – изменением структуры нитей и температурными метаморфозами, что учтено в снижении конечной прочности нитей на 2/3), то примем сечение полуарок конструктивно в виде трубы общим диаметром 150 мм, толщиной 5 мм и соединением на фланцевые стыки отдельных элементов. Масса полуарки ориентировочно составит 220 кг (при ее длине в 20,48 м). Требуемая статическая мощность крана в таком случае может быть оценена по формуле

$$P_{ст} = \frac{Q_n V}{10^3 \eta_{тр} k_p}, \quad (4)$$

где Q_n – требуемая грузоподъемность, равная 36,7 кг (вес полуарки в условиях тяготения Луны); V – максимальная скорость подъема, принята равной 0,007 м/с (на основании данных о безопасной скорости движения марсохода Perseverance³⁵); $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии, принят равным 0,985 – как для механической трансмиссии; k_p – коэффициент коррекции, связанный со снятием с двигателя мощности, принимается в интервале от 0,93 до 0,96.

Подставив указанные выше значения в (3), получим значение требуемой мощности для подъема одной полуарки, которое составит 3 Вт.

Основные операции возведения предлагаемой конструкции АЭС приведены на рис. 3.

³⁰ Луноход (космическая программа). URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Луноход_\(космическая_программа\)#Управление](https://ru.wikipedia.org/wiki/Луноход_(космическая_программа)#Управление) (дата обращения: 28.02.2022).

³¹ Кэбин Э. Радиоизотопные источники электрической энергии и тепла. URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/nuc_tech/isotopes/index.html (дата обращения 28.02.2022); В России разработали ядерную батарейку на никеле-63, работающую 50 лет. URL: <https://habr.com/ru/news/t/391187/> (дата обращения: 28.02.2022); Сенсация от китайских ученых. Они создают первый луноход с атомным двигателем. URL: https://www.ltv.ru/news/2007-04-17/211519-sensatsiya_ot_kitayskih_uchenyh_oni_sozdayut_pervyy_lunohod_s_atomnym_dvigatелем (дата обращения: 28.02.2022).

³² Луна, лунный грунт и химический состав лунных пород. URL: <http://www.pppa.ru/additional/12zem/geographic-shell-7414.php> (дата обращения: 28.02.2022).

³³ Марсоход Perseverance. URL: <https://www.nasa.gov/perseverance> (дата обращения: 28.02.2022).

³⁴ Прочность титана в сравнении со сталью. URL: <https://varimtutru.com/prochnost-titana-v-sravnении-so-stalyu/> (дата обращения: 28.02.2022).

³⁵ Марсоход Perseverance. URL: <https://www.nasa.gov/perseverance> (дата обращения: 28.02.2022).

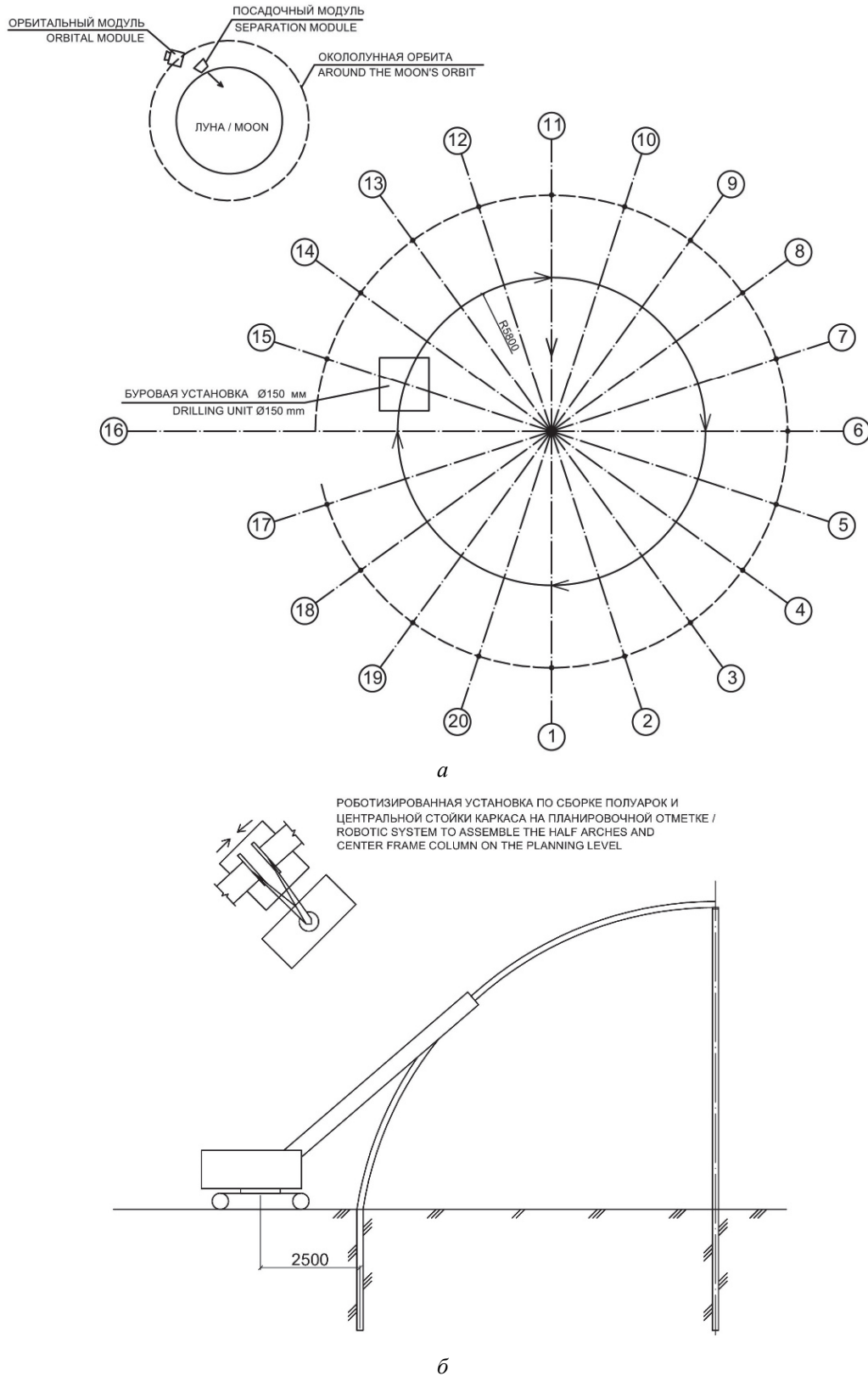


Рис. 3. Основные операции при возведении АЭС:

a – бурение скважин; *б* – сборка элементов каркаса и установка каркаса в проектное положение

Figure 3. The main operations during the construction of the nuclear power plant:

a – drilling wells; *б* – assembling the elements of the framework and installation of the framework in the designed position

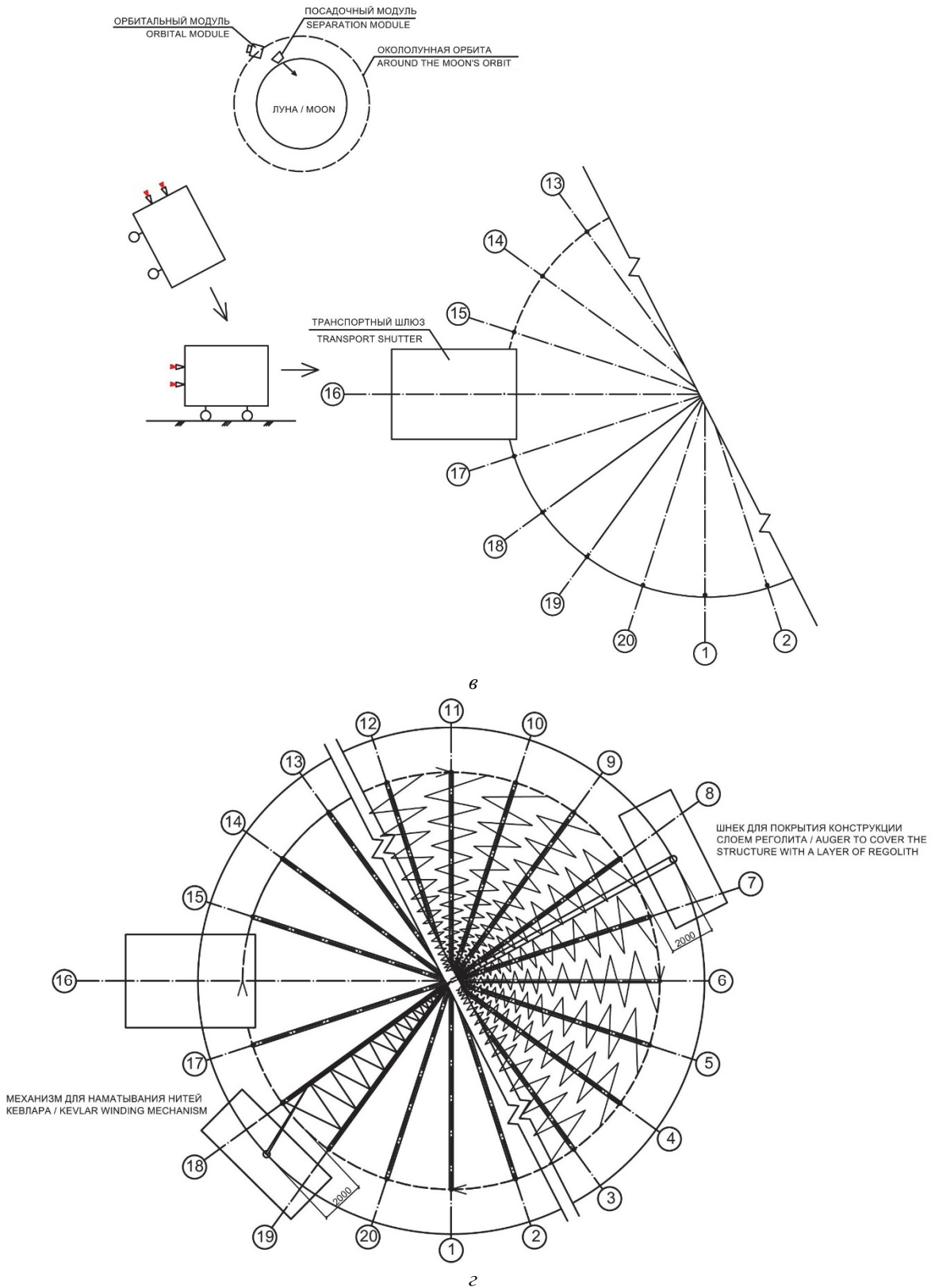


Рис. 3. Основные операции при возведении АЭС (продолжение):
 в – установка транспортного шлюза; з – навивка нитей кевлара и покрытие конструкции реголитом
Figure 3. The main operations during the construction of the nuclear power plant (continuation):
 в – installation of the transport airlock; з – winding the strands of kevlar and covering the structure with regolith

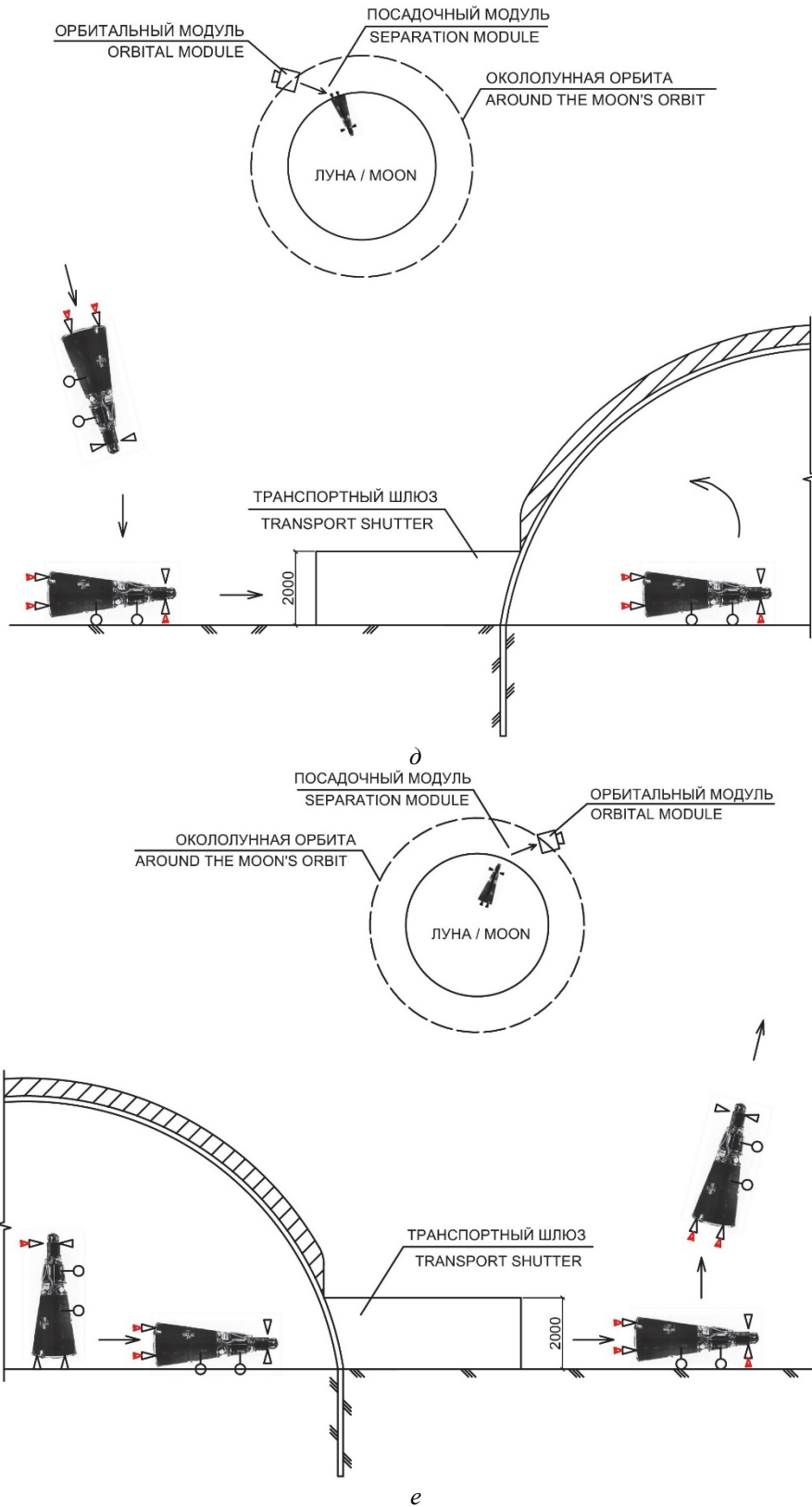


Рис. 3. Основные операции при возведении АЭС (окончание):
 δ – установка модулей в группу; ϵ – утилизация модулей
Figure 3. The main operations during the construction of the nuclear power plant (ending):
 δ – installation of modules in the group; ϵ – disposal of modules

3. Обсуждение

На основании выполненного анализа наиболее перспективной из существующих на данный момент ядерных установок для использования в условиях Луны как стационарной АЭС являются установки с реакторами на быстрых нейтронах, использующими газы в качестве теплоносителей (например, «Ромашка», SAFE-400 и т. д.). В качестве преобразователей электрической энергии эффективны термоэлектрические генераторы, так как они основаны на прямом преобразовании тепловой энергии в электрическую посредством полупроводниковых элементов или двигателей Стирлинга. Поскольку рассмотренные установки обладают малой единичной мощностью относительно требований экономической целесообразности (определенных NASA) и отсутствует информация о надежности их работы в условиях падения метеоритов и космических камней, предполагается групповое размещение установок. Технология получения электрической энергии с использованием термоэлектрических генераторов (или двигателей Стирлинга) позволяет осуществить такое групповое размещение с реализацией единой внешней защиты от падения метеоритов, космических камней, а также радиационной защиты от амплитудных возмущений в космическом пространстве, что гарантирует работоспособность и надежность работы АЭС в условиях Луны.

Изученные реакторные установки при работе в группе в космическом пространстве (в условиях Луны) требуют защиты от падения космических тел в течение срока эксплуатации только в виде космических камней, вероятность попадания их в пятно расположения сооружения превышает допустимую, согласно «Рекомендациям по применению принципов и способов противояварийной защиты в проектах строительства»³⁶. Защита может быть организована за счет использования комбинированной ограждающей конструкции с применением кевларовой ткани, которая обладает необходимой прочностью при динамических воздействиях (что также подтверждается в [17]), и местного грунта – реголита. Анализ существующих исследований, посвященных архитектурно-строительным решениям ста-

ционарных комплексов на Луне и Марсе [16; 17], показал, что защита внутреннего пространства от амплитудных колебаний радиоактивного излучения и температуры также может быть организована с применением реголита. Он обладает необходимыми характеристиками для частичного радиационного сжигания остаточного тепловыделения при выработке энергии за счет свойств поглощения [20], позволяет некоторым образом рассредоточить нагрузку от падающих космических камней, а жесткий каркас, выполненный в титане (в отличие от «надутых» систем [16; 17]), способен обеспечить постоянный объем внутреннего пространства и равноудаленность установок друг от друга при внешних воздействиях.

Заключение

Оценка концепта защитной конструкции АЭС на Луне показывает, что реакторные установки можно утилизировать на соответствующую орбиту по завершении срока эксплуатации без использования сложной технологии их переработки за счет наличия транспортного модуля и самой конструкции технического устройства установки, при этом защитная оболочка в виде ограждающей конструкции допустимо использовать еще раз. При ее строительстве не требуется значительной мощности и особого вида оборудования, а в качестве основных источников может быть использована энергия радиационных изотопов.

В качестве дальнейших исследований предлагается произвести проверку радиационного теплопоглощения реголита путем математического моделирования при известных свойствах; определить толщину, необходимую для снижения амплитуды радиационного воздействия; рассмотреть иные технические возможности нанесения реголита на поверхность купола, в том числе 3D-печать; учесть старение и потерю свойств кевлара при действии температурных колебаний и космической радиации; подробно проанализировать работу и долговечность несущих конструкций купола в условиях температурного воздействия, низких гравитационных сил, влияния падающих рядом космических тел путем математического моделирования методом конечного элемента.

³⁶ Рекомендации по применению принципов и способов противояварийной защиты в проектах строительства. Методические подходы. М.: Москомархитектура, 2004.

Список литературы / References

1. Sherwood B. Principles for a practical Moon base. *Acta Astronautica*. 2019;160:116–124. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.04.018>
2. Ponomarev-Stepnoi NN. Nuclear power engineering in space. *Atomic Energy*. 1989;66(6):371–373. (In Russ.)
Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная энергетика в космосе // Атомная энергия. 1989. Т. 66. Вып. 6. С. 371–373.
3. Bennett GL. Introduction to space nuclear power and propulsion. In: Greenspan E. (ed.) *Encyclopedia of Nuclear Energy*. Elsevier; 2021. p. 155–167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819725-7.00133-1>
4. Fribourg Ch, Roux JP. Nuclear power generation for planetary exploration why not a pwr? *Acta Astronautica*. 2000;47(2–9):91–95. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(00\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(00)00047-3)
5. Taylor GJ. Lunar science: using the Moon as a test-bed // *Lunar and Planetary Instruments, Workshop on Advanced Technologies for Planetary Instruments. Part 1. Lunar and planetary Exploration*. 1993, January 1. Available from: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930019632> (accessed: 15.03.2022).
6. Sherwood B. Principles for a practical Moon base. *Acta Astronautica*. 2019;160:116–124. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.04.018>
7. Zubrin R. The Moon – Mars Initiative: making the vision real. *Futures*. 2009;41(8):541–546. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2009.04.018>
8. Rosen R, Schnyer AD. Civilian uses of nuclear reactors in space. *Science & Global Security*. 1989;1:147–164
9. Meloy TP, Williams MC. The Moon then Mars. *Minerals Engineering*. 2002;15(3):115–121. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00009-2)
10. Murray WS, Antonellis R. China’s Space Program: the dragon eyes the Moon (and Us). *Orbis*. 2003;47:4645–4652. [https://doi.org/10.1016/S0030-4387\(03\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S0030-4387(03)00084-X)
11. Nguyen T. Powering human settlements in space. *ACS Central Science*. 2020;6(4):450–452. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.0c00382>
12. Kukharkin NE, Ponomarev-Stepnoy NN, Usov VA. *Space nuclear power engineering (nuclear reactors with thermoelectric and thermal emission conversion – “Romashka” and “Yenisei”)*. 2nd ed., suppl. Moscow: Izdat Publ.; 2012. (In Russ.)
Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием – «Ромашка» и «Енисей»). 2-е изд., доп. М.: ИздАТ, 2012. 226 с.
13. Bogush IP, Gryaznov GM, Zhabotinsky EE, Markarov AN, Serbin VI, Trukhanov YuL. Space thermal emission nuclear power unit under “Topaz” program: design principles and operation conditions. *Atomic Energy*. 1991;70(4):211–213. (In Russ.)
Богуш И.П., Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е., Маркаров А.Н., Сербин В.И., Труханов Ю.Л. Космическая термоэмиссионная ЯЭУ по программе «Топаз»: принципы конструкции и режимы работы // Атомная энергия. 1991. Т. 70. Вып. 4. С. 211–213.
14. Poston DI, Kapernick RJ, Guffee RM. Design and analysis of the SAFE-400 space fission reactor. *AIP Conference Proceedings*. 2002;608:578–588. <https://doi.org/10.1063/1.1449775>
15. Dalcher AW, Sutherland JD. Design of the SNAP 10A reactor. *SAE World Congress & Exhibition Technical Paper*. 1964. <https://doi.org/https://doi.org/10.4271/640218>
16. Medvedev Yu. “Topaz-2” will be tested in space. The Americans. *Tekhnika Molodezhi*. 1993;(5):2–3. (In Russ.)
Медведев Ю. «Топаз-2» испытуют в космосе. Американцы // Техника – молодежи. 1993. № 5. С. 2–3.
17. Zagoruyko AA. Design features of space stations for lunar and Mars exploration. *Science. Education and Experimental Design*. 2020;(1):451–454. (In Russ.)
Загоруйко А.А. Конструктивные особенности космических станций освоения Луны и Марса // Наука, образование и экспериментальное проектирование. 2020. № 1. С. 451–454.
18. Tarasevsky FG. Application of regolith for base construction on the Moon. *Young Scientist*. 2016;(29(133)): 158–161. (In Russ.)
Тарасевский Ф.Г. Применение реголита при возведении базы на Луне // Молодой ученый. 2016. № 29 (133). С. 158–161.
19. Tripathi RK, Wilson JW, Badavi FF, De Angelis G. A characterization of the moon radiation environment for radiation analysis. *Advances in Space Research*. 2006; 37(9):1749–1758. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006>
20. Naito M, Hasebe N, Shikishima M, Amano Y, Haruyama J, Matias-Lopes JA, Kim KJ, Kodaira S. Radiation dose and its protection in the Moon from galactic cosmic rays and solar energetic particles: at the lunar surface and in a lava tube. *Journal of Radiological Protection*. 2020; 40(4):947–961. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/abb120>
21. Sluta E. Physical and mechanical properties of the lunar soil (review). *Astronomical Bulletin*. 2014;48(5): 358–382.
Слута Е. Физико-механические свойства лунного грунта (обзор) // Астрономический вестник. 2014. Т. 48. № 5. С. 358–382.
22. Hayne PO, Bandfield JL, Siegler MA, Vasavada AR, Ghenet RR, Williams J-P, Greenhagen BT, Aharonson O, Elder CM, Lucey PG, Paige DA. Global regolith thermo-

physical properties of the Moon from the diviner lunar radiometer experiment. *JGR: Planets*. 2017;122(12): 2371–2400. <https://doi.org/10.1002/2017JE005387>

23. Ellery A. Sustainable in-situ resource utilization on the moon. *Planetary and Space Science*. 2020;184: 104870. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104870>

24. Heinicke Ch, Adeli S, Baqué M, Correale G, Fateri M, Jaret S, Kopacz N, Ormö J, Poulet L, Verseux C. Equipping an extraterrestrial laboratory: overview of open research questions and recommended instrum. *Advances in Space Research*. 2021;68(6):2565–2599. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.047>

Сведения об авторах

Белов Вячеслав Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6246-6100, Scopus Author ID: 57218418373, eLIBRARY SPIN-код: 6936-1160; boks-obn@list.ru

Сазонова Светлана Андреевна, студент, кафедра строительства объектов тепловой и атомной энергетики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0003-4025-2053; s.sazonovaa17@mail.ru

About the authors

Vyacheslav V. Belov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction of Thermal and Atomic Power Industry Facilities, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6246-6100, Scopus Author ID: 57218418373, eLIBRARY SPIN-code: 6936-1160; boks-obn@list.ru

Svetlana A. Sazonova, student, Department of Construction of Thermal and Atomic Power Industry Facilities, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4025-2053; s.sazonovaa17@mail.ru