

УДК 621.039.578:629.78

## МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В ОКРЕСТНОСТИ ЛУННОЙ ЯДЕРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Пышко А.П.<sup>1\*</sup>, Плотников А.Ю.<sup>1\*\*</sup>, Сонько А.В.<sup>1\*\*\*</sup>, Фролов О.В.<sup>1</sup>,  
Еремин А.Г.<sup>2\*\*\*\*</sup>, Зарицкий Г.А.<sup>2\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Государственный научный центр Российской Федерации —  
Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского,  
ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского, пл. Бондаренко, 1, Обнинск, Калужская обл., 249033, Россия

<sup>2</sup> Красная Звезда, Электролитный проезд, 1А, Москва, 115230, Россия

\* e-mail: pyshko@ippe.ru

\*\* e-mail: plotnikov@ippe.ru

\*\*\* e-mail: sonko@ippe.ru

\*\*\*\* e-mail: andreev@redstaratom.ru

---

Представлены варианты размещения на поверхности Луны ядерной электрической станции (ЯЭС), содержащей один или несколько термоэмиссионных модулей (ТМ). В качестве ТМ рассмотрена термоэмиссионная ядерная энергетическая установка (ЯЭУ) электрической мощностью 50 кВт. Приведены результаты расчёта радиационной обстановки на поверхности Луны в окрестности ядерного реактора, расположенного в шахте; распределения полей излучения, генерируемых как работающим реактором, так и продуктами деления и наведенной в лунном грунте (реголите) активностью после 10-летнего ресурса; варианты оптимального взаимного расположения четырёх ТМ, подстанции и лунной базы при последовательном вводе ТМ в действие. Предлагаемые варианты обеспечивают минимальные массогабаритные характеристики электрокоммуникаций (ЭК) и заданные уровни облучения при монтаже ЯЭС, обслуживании подстанции и на лунной базе.

*Ключевые слова:* ядерная электрическая станция, термоэмиссионный модуль, Луна, радиационная защита, доза, радиационная обстановка.

---

### Введение

Вопросам размещения ядерной электрической станции на поверхности планет посвящено большое количество публикаций [1, 2]. В первую очередь способ размещения связан с затратами на ослабления реакторного излучения ЯЭС. В итоге все исследователи указывают три основных способа раз-

мещения реактора: непосредственно на поверхности планеты с использованием привозных материалов радиационной защиты (РЗ), обваловка реактора местным грунтом и помещение реактора в предварительно заготовленной шахте. Возможны также комбинации названных методов.

Авторами настоящей статьи также выполнялись аналогичные исследования, результаты которых заключаются в выборе нескольких основных вариантов радиационной защиты [3].

Первый вариант РЗ — сама РЗ входит в состав ЯЭУ и доставляется с Земли, масса РЗ ~8 т. Второй вариант — ЯЭС с РЗ из обваловки лунным реголитом; масса грунта, необходимого для установки защитного вала, составляет ~1000 т. Третий вариант основывается на размещении ТМ в предварительно подготовленной шахте глубиной около 3 м и диаметром немногим более 1 м. В настоящей работе вариант с шахтным размещением реактора ЯЭС рассмотрен более подробно.

В связи с возможным повышением уровня энергопотребления лунной базы появляется необходимость увеличения мощности ЯЭС. Повышения мощности можно добиться двумя способами: увеличить мощность одного реактора или разместить на планете несколько реакторов с малой мощностью. В статье приведено решение задачи по выбору взаимного расположения группы из четырёх ТМ (общей электрической мощностью 200 кВт), приборного отсека (ПО) и лунной базы.

### Методика расчёта

Решение задачи расчёта оптимальной РЗ осуществлялось в три этапа.

На первом этапе определялся высотный профиль РЗ. В качестве основного расчётного инструмента первого этапа использовался двумерный ( $r, z$ -геометрия) код РАПИД-КОНТ [4], в котором реализованы алгоритмы численного решения интегрального уравнения переноса методом последовательных столкновений. Параллельно проводились также расчёты по двумерному коду КАСКАД [5], в котором реализованы различные алгоритмы решения уравнений переноса методом дискретных ординат.

Указанные коды использовались для получения токов вклада, необходимых для расчёта оптимального профиля защитных слоёв. Оптимальный профиль вычислялся с использованием теории оптимального управления и указанных выше токов контрибуторов [6].

На втором этапе полученные варианты конфигурации радиационной защиты уточнялись и доводились с помощью расчётов по коду MCNP [7], реализующему метод Монте-Карло, для получения решения уравнения переноса излучений в трёхмерной геометрии. Код MCNP использует библиотеку оценённых данных ENDF/B-VI [8] с непрерывной зависимостью сечения взаимодействия излучения с веществом.

Наведённая активность лунного грунта и активность продуктов деления рассчитывались с использованием кода КАМОД-К [9].

В качестве коэффициентов перевода потока нейтронов и фотонов в дозу использовались значения, рекомендованные в НРБ-99 [10].

На третьем этапе для выбранного оптимального варианта ЯЭС с одним ТМ строилась её модель как источника излучения. Затем с помощью оптимизационных алгоритмов находилась оптимальная расстановка термоэмиссионных модулей ЯЭС с учётом последовательности их ввода в эксплуатацию.

### Характеристики радиационной защиты и радиационная обстановка в окрестности ЯЭС, работающей на мощности

Представленные выше данные дают информацию для выбора стратегии энергообеспечения лунной базы. Доставка 8 т защитных материалов требует дополнительного рейса транспортного буксира, однако значительно снижает время установки ЯЭС. Для обваловки ЯЭС или сооружения шахты также необходима доставка механизмов. Для установки ЯЭС требуется дополнительное время и ресурсы, однако доставленные с Земли механизмы будут использованы при сооружении жилого комплекса базы и других работ.

Рассматривался вариант размещения ЯЭС на расстоянии 1 км от базы. Требования к уровням излучения сводились к обеспечению в пределах 30-градусной зоны биологической дозы не более 5 сЗв/год и не более 100 сЗв/год в других направлениях.

На основании проведённых параметрических и оптимизационных расчётов для обеспечения требуемых уровней радиационной обстановки в окрестности ЯЭС был выбран представленный на рис. 1 вариант размещения реактора (размеры в сантиметрах).

Основные характеристики варианта:

- глубина шахты 372 см;
- толщина защиты блока приводов из гидрида лития 50 см;
- толщина защитного слоя из обеднённого урана 4 см;
- защита максимально приближена к реактору;
- технологические зазоры (10 см) между боковой поверхностью шахты и защитой ( $h = 50$  см) заполнены гранулированным гидридом лития с плотностью 0,4 г/см<sup>3</sup>.

Кроме того, необходимо наличие дополнительного кольца из гранулированного гидрида лития

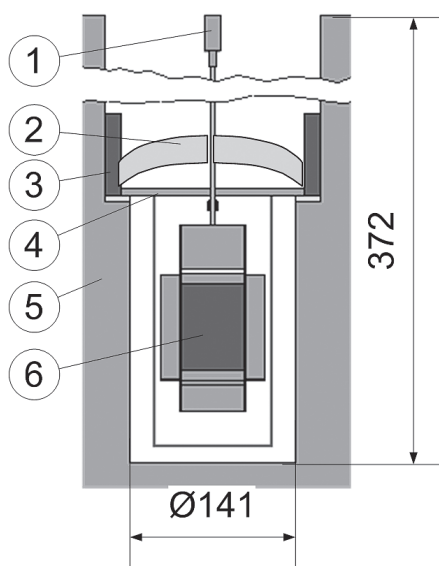


Рис. 1. Расчётная схема размещения реактора в шахте: 1 — привод стержней безопасности; 2 — РЗ из гидрида лития; 3 — РЗ из гранулированного гидрида лития; 4 — РЗ из обеднённого урана; 5 — лунный грунт; 6 — реактор

над защитой высотой 25 см. Блок приводов должен находиться ниже уровня грунта.

На рис. 2 представлены результаты расчётов радиационной обстановки в окрестности ЯЭС, выполненные на высоте 175 см от поверхности Луны. Анализ результатов расчётов показал, что при проведении работ в течение 100 ч на расстоянии 20 м от шахты доза от нейтронного и фотонного излучения реактора составляет ~2 сЗв.

### Радиационная обстановка в окрестности остановленного реактора

Расчёты радиационных нагрузок были выполнены для установки, отработавшей в течение 10 лет.

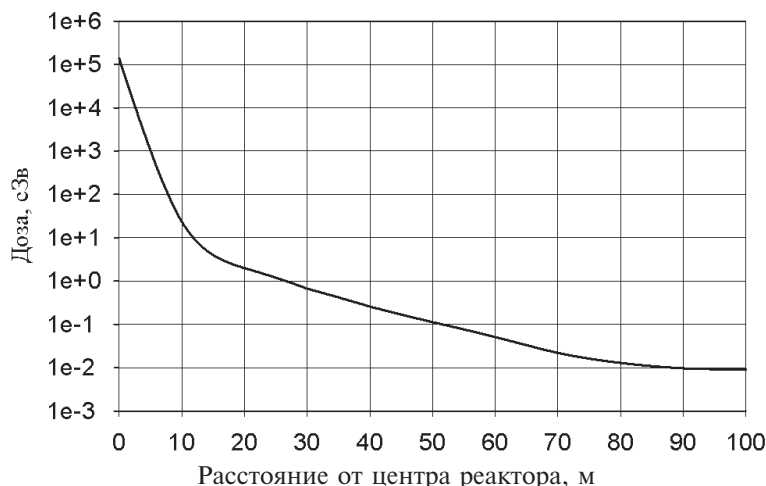


Рис. 2. Доза на высоте 175 см над поверхностью Луны за 100 ч работы

Радиационная обстановка в окрестности остановленной ЯЭС определяется в основном наведённой активностью грунта, окружающего реактор. Вклад остаточного гамма-излучения наработанных продуктов деления в топливе реактора в выбранном варианте значительно уменьшается при засыпке шахты грунтом.

На рис. 3 приведены результаты расчётов дозы гамма-излучения вблизи остановленного реактора через 30 дней выдержки после 10 лет работы реактора. Вклад в дозу вносили наведённая активность грунта и остаточная активность реактора. При засыпке шахты лунным грунтом (с плотностью в два раза меньше номинальной) доза гамма-излучения уменьшается примерно в пять раз, например, на расстоянии 20 м от шахты с 0,016 до 0,003 сЗв за год. Отметим, что годовая доза от галактических космических лучей без солнечных вспышек на поверхности Луны составляет 25—50 сЗв.

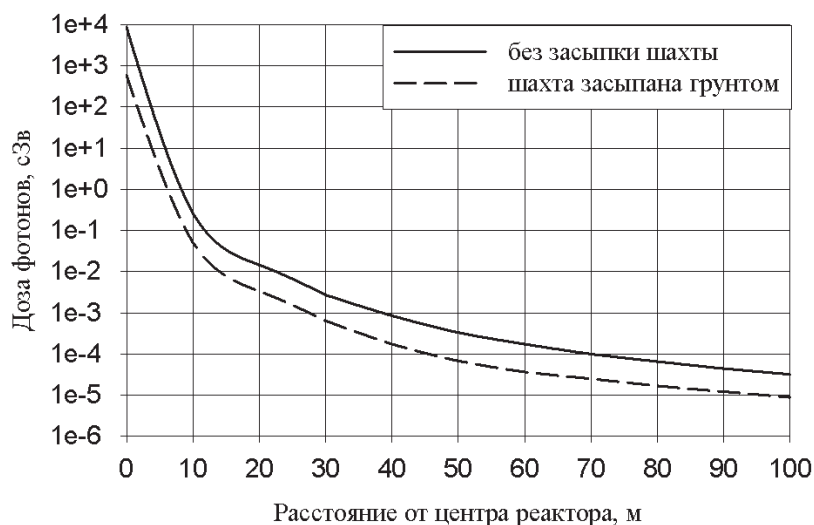


Рис. 3. Доза гамма-излучения на высоте 175 см над поверхностью Луны

### Выбор взаимного расположения группы из четырёх термоэмиссионных модулей

При выборе компоновки группы ядерных электростанций было необходимо обеспечить определённую радиационную обстановку в их окрестности, а именно ограниченную мощность дозы при монтаже очередного ТМ при работающих остальных, требуемую мощность дозы в районе ПО и заданную годовую дозу на лунной базе.

Предполагается последовательная схема введения в эксплуатацию группы ЯЭС из четырёх станций. Кроме того, предусматривается возможность замены вышедшего из строя ТМ на один из двух резервных. Таким образом, требуется обеспечить допустимые уровни излучения на трёх защищаемых объектах — ТМ, ПО и лунной базе.

Предел годовой дозы от ядерного энергетического комплекса на лунной базе задан равным 5 сЗв.

Предел дозы при монтаже ТМ был принят равным 4 сЗв по следующим соображениям. Годовая доза от ядерного энергетического комплекса на лунной базе составляет 5 сЗв. Монтажники ТМ являются специфическим персоналом и пребывают на Луне только в период монтажа, т.е. менее года (около трех месяцев). Предполагается, что за время пребывания в лагере они получают 1 сЗв, а остальные 4 сЗв — непосредственно при работах на ТМ. Время пребывания человека в районе ТМ принято равным 100 ч.

Время профилактических работ на ПО для одного человека принято равным 5 часам, а предел дозы — 1 сЗв.

Принятые в расчётах ограничения по дозам могут быть в дальнейшем пересмотрены, например, с учётом «Методических указаний по ограничению облучения космонавтов при околоземных космических полетах» [11], согласно которым основной

предел эквивалентной дозы космонавта за космический полет продолжительностью до одного года не должен превышать 50 сЗв.

В расчётах рассмотрены два типа ЭК, а именно коммуникации, соединяющие подстанцию с каждым из ТМ, и коммуникации, соединяющие подстанцию с лунной базой.

Зависимость массы ЭК от расстояния приведена на рис. 4.

На основе параметрических расчётов одиночного термоэмиссионного модуля была разработана суперпозиционная расчётная модель для оценки дозы от нескольких станций.

С использованием разработанной математической модели решалась следующая оптимизационная задача: определить взаимное расположение ЯЭС, подстанции и лунной базы, при котором масса ЭК принимает минимальное значение.

В качестве целевой функции использовалась масса коммуникаций между подстанцией и каждым из шести ТМ, а также масса ЭК между подстанцией и лунной базой.

В качестве ограничений использованы следующие условия:

- 13 ограничений по дозе на каждом из монтируемых ТМ;
- 11 ограничений по дозе на ПО;
- 11 ограничений по дозе на базе;
- 13 ограничений по расстоянию между ТМ.

Минимальное расстояние между ТМ выбрано равным 20 м, что обусловлено 8-метровым габаритом панели холодильника-излучателя и введением 4-метрового зазора для прохода между модулями.

В качестве варьируемых параметров приняты координаты на плоскости каждого ТМ и координата границы лагеря по оси  $X$ . Всего использовано 13 варьируемых переменных.

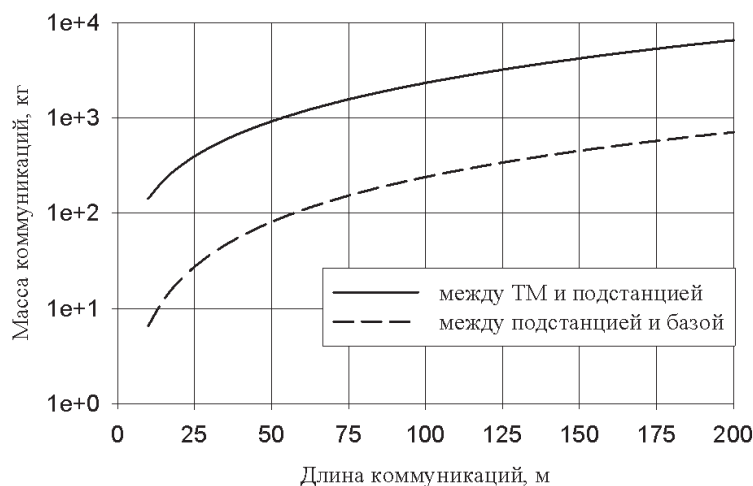


Рис. 4. Масса электрокоммуникаций как функция расстояния

По составленной оптимизационной модели была выполнена серия расчётов, в которой менялись взаимное положение и стартовые координаты основных и резервных ТМ. Оказалось, что минимальная масса обеспечивается при чередовании двух основных ТМ и одного резервного. При повороте вокруг центра ПО на угол  $90^\circ$  минимальное значение массы практически не изменялось.

На рис. 5 показано взаимное расположение присутствовавших в оптимизационной задаче объектов.

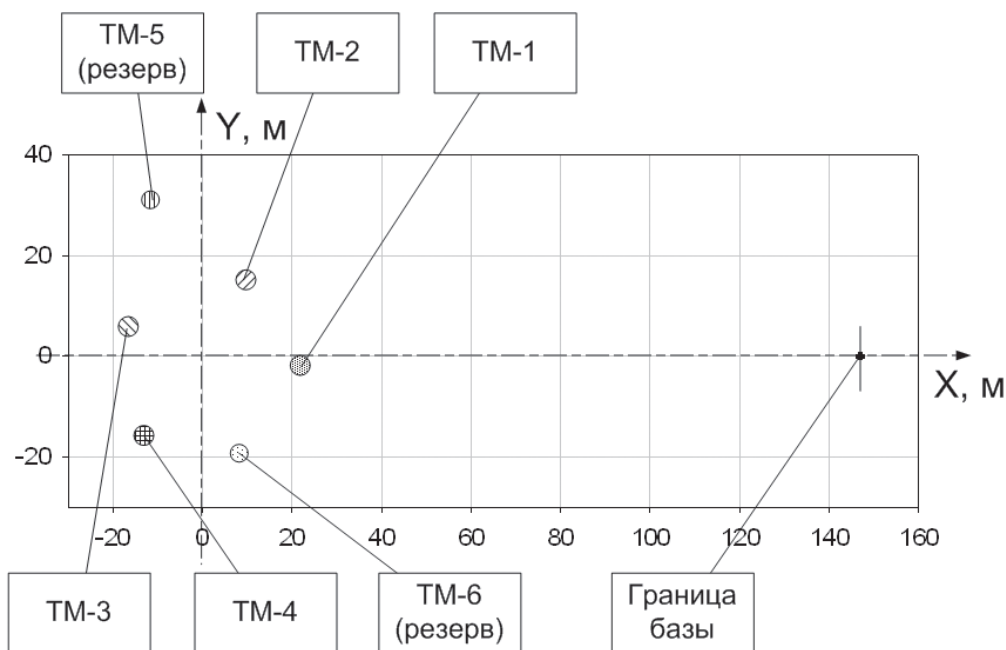


Рис. 5. Расстановка ЯЭС, ПО и лунной базы

При формулировке ограничений на дозы предполагалось, что станции монтируются в последовательности, представленной на рис. 5 (координаты указаны в метрах). При работе на ТМ-2 учитывается излучение станции ТМ-1; при работе на ТМ-3 — ТМ-1, ТМ-2, а при работах на ТМ-4 — ТМ-1, -2 и -3. При монтаже резервного ТМ-5 учитываются поочерёдно три из четырёх основных ТМ, а при монтаже ТМ-6 — три из четырёх основных и пятого резервного ТМ.

Масса ЭК составляет 2,51 т, в том числе масса коммуникаций между ПО и базой равна 0,43 т, а масса коммуникаций между всеми шестью ЯЭС и ПО равна 2,08 т. Ограничения по дозам на ТМ, ПО и базе составляют 4, 1 и 5 сЗв соответственно. Расстояния между соседними ТМ не менее 20 м.

На рис. 6 приведена годовая доза нейтронного и гамма-излучения в непосредственной окрестности ЯЭС, а на рис. 7 — на расстояниях, достигающих границ лунной базы.

Уровни  $n, \gamma$ -излучения на электронном оборудовании ПО за 10-летний ресурс для любого заглубления составляют  $\sim 2 \cdot 10^{11}$  н/см<sup>2</sup> и  $\sim 1 \cdot 10^4$  сЗв, по быстрым нейтронам и фотонам соответственно, что не превышает допустимых значений.

На рис. 8 приведена годовая доза фотонного излучения в окрестности остановленных ЯЭС, которая обусловлена активностью продуктов деления, конструкционных материалов и реголита. Приведены два варианта радиационной обстановки: с засыпкой шахты лунным грунтом и без засыпки.

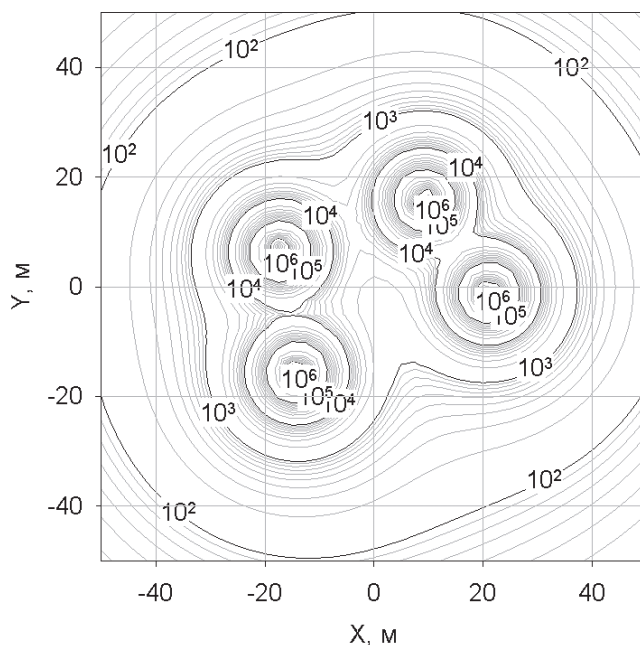


Рис. 6. Дозы излучения от группы работающих ЯЭС (окрестность станции), сЗв



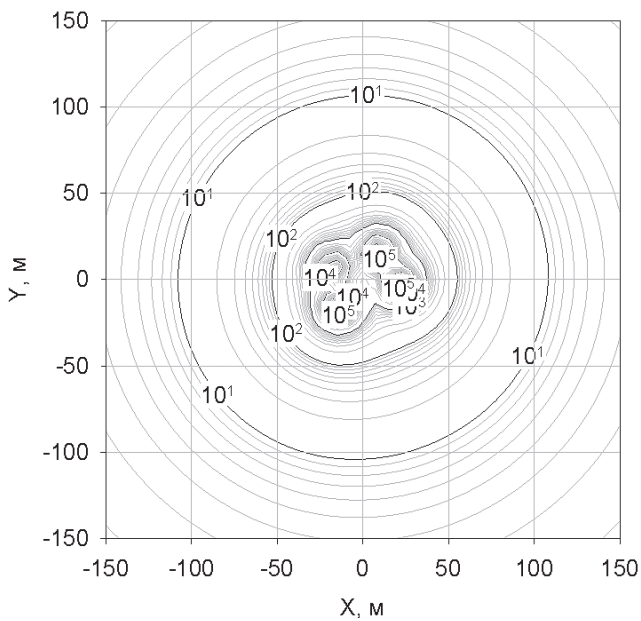


Рис. 7. Дозы излучения от группы работающих ЯЭС (до границы базы), сЗв

100 ч работы на ТМ. Возможный эффект составляет примерно 300 кг. Увеличение предела дозы с 4 до 10 сЗв снижает массу кабелей на 300 кг. Это изменение предельной дозы эквивалентно увеличению персонала монтажников в 2.5 раза. По-видимому, доставка на Луну даже одного человека стоит гораздо дороже доставки 300 кг груза.

Вторым способом является снижение выхода излучения из реактора посредством введения дополнительной защиты.

На рис. 10 приведены зависимости массы ЭК и дополнительной защиты. Видно, что введение дополнительной защиты дает эффект при кратностях ослабления до 2,5 раз. Такую кратность ослабления может дать карбид бора толщиной 6 см в форме стакана, днищем примыкающего к верхнему торцу реактора. При дальнейшем увеличении защиты суммарная масса начинает возрастать. Так же, как и в предыдущем пункте, можно снизить суммарную массу лишь на 300 кг. При этом возникнут конст-

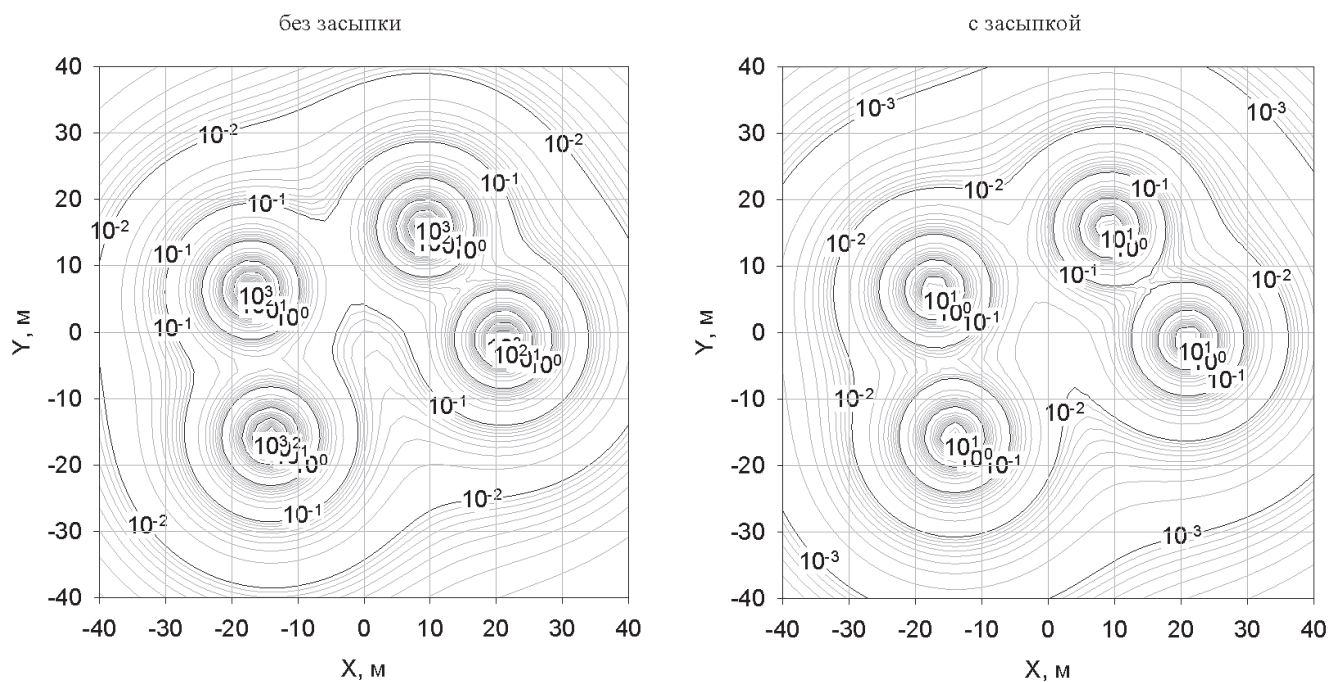


Рис. 8. Годовая доза фотонного излучения в окрестности группы остановленных ЯЭС, сЗв

**Возможные пути дальнейшего снижения массы ЭК**

Разработанная оптимизационная модель позволяет продолжить поиск оптимальных решений посредством изменения ограничений и исходных данных. Ниже в качестве иллюстрации приведены два возможных направления снижения массы ЭК.

К первому относится повышение пределов доз при монтаже ТМ. На рис. 9 приведена зависимость массы кабелей от дозы, получаемой человеком за

рукторские сложности по введению защиты вдоль боковой поверхности.

Представленные результаты показывают, что выбранный вариант защиты и расположения ТМ в шахте близок к оптимальному. Дальнейшее снижение массы ЭК приводит к трудностям в смежных областях.

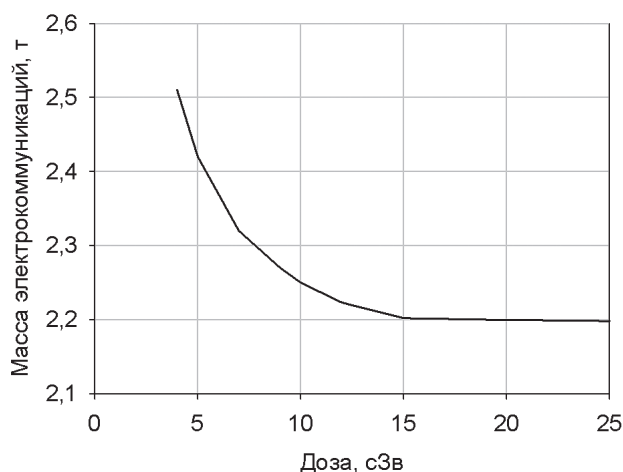


Рис. 9. Зависимость массы электрокоммуникаций от дозы, полученной при монтаже ТМ за 100 ч

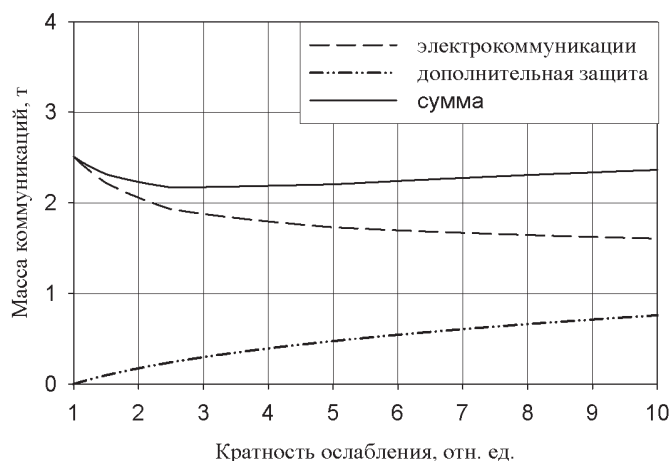


Рис. 10. Зависимость массы защиты и электрокоммуникаций от дополнительной кратности ослабления

## Выводы

В статье представлены результаты расчётно-конструкторских исследований радиационной обстановки в окрестности ЯЭС при размещении реактора ТМ в шахте во время работы на мощности и после остановки реактора. Рассмотрены возможные варианты конструктивных изменений, направленные на уменьшение мощности дозы от реакторного излучения.

1. В результате оптимизационно-вариантных расчётов выбран следующий вариант размещения реактора в шахте и его радиационной защиты. Глубина шахты равна 3,7 м. Торцевая защита ТМ включает урановый диск толщиной 4 см, гидридлитиевый отсек толщиной 50 см. Зазор между отсеком LiH и стенкой шахты заполнен насыпным гидридом лития. Также над отсеком размещено примыкающее к стенке шахты цилиндрическое кольцо толщиной 10 см и высотой 20 см.

2. Для выбранного варианта размещения ТМ получено оптимальное взаимное расположение четырёх ЯЭС, подстанции и лунной базы. Предлагаемая расстановка объектов обеспечивает заданные уровни облучения на защищаемых объектах и минимальные массогабаритные характеристики ЭК (суммарная масса коммуникаций между ПО и каждым из 6-ти ТМ составляет 2,08 т, масса коммуникаций между ПО и лунной базой — 0,43 т, расстояние от ПО до лунной базы равно 146 м).

3. Радиационная обстановка в окрестности остановленной ЯЭС определяется в основном дозой гамма-излучения от активации лунного грунта. При засыпке шахты реголитом доза гамма-излучения от остаточной активности реактора и наведенной активации грунта уменьшается в пять раз.

## Библиографический список

1. *Smitherman D.V. Jr., Dayal V., Dunn II D. J.* Architecture for a Mobile Lunar Base Using Lunar Materials// Space Technology Applications International Forum, STAIF-2006, M.S.El-Genk, ed., AIP Conference Proceedings, 813, pp. 1022-1029, 2006.
2. *Mason L.S.* A Comparison of Fission Power System Options for Lunar and Mars Surface Applications// Space Technology Applications International Forum, STAIF-2006, M.S.El-Genk, ed., AIP Conference Proceedings, 813, pp. 270-280, 2006.
3. *Плотников А.Ю., Пышко А.П., Сосько А.В.* Особенности выбора радиационной защиты для напланетных АЭС // Атомная энергия. 2008. Т. 105. Вып. 2. С. 72-79.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «РАПИД-КОНТ» №.2013661631. Российская Федерация. Заявка №2013619797. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.12.2013г. Авторы: Левченко В.М., Плотников А.Ю., Пышко А.П.
5. *Волощенко А.М.* Вычислительные возможности пакета программ РОЗ-6.5/КАСКАД-С-2.0/КАТРИН-1.0 для решения стационарного уравнения переноса нейтронов, фотонов и заряженного излучения методом дискретных ординат в 1D, 2D и 3D геометриях // Тезисы докладов VIII Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». Обнинск, 2002, 30-33.
6. *Пышко А.П., Плотников А.Ю.* Расчёт и оптимизация радиационной защиты космических ЯЭУ // Атомная энергия. 2004. Т. 97. Вып. 1. С. 46-54.
7. *Briesmeister J. F. (Ed.).* MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport code. — LA-12625-M, Vers. 4B 1997. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mightylib.mit.edu/Student%20Materials/books/mcnp4b.pdf> (дата обращения: 11.12.2014).

8. ENDF/B-VI Data for MCNP TM: Los Alamos National Laboratory report; Hendricks J.S., Frankle S.C., Court J.D. — 1994, LA-12891. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ru.scribd.com/doc/101105955/Endf-B-Vi-Data-for-Mcnp> (дата обращения: 11.12.2014).
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «КАМОД-К» №.2013661632. Российская Федерация. Заявка №2013619798. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.12.2013г. Автор Фролов О.В.
10. Санитарные правила СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nucloweb.jinr.ru/nucloserv/inform/instructions/nrb-99-2009.pdf> (дата обращения: 02.02.2014).
11. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах (ООКОКП-2004): Методические указания МУ 2.6.1.44-03-2004. — М.: ФУ «Медбиоэкстрем», 2004. — 42 с.

## METHODS OF ENSURING THE RADIATION SITUATION IN THE NEIGHBORHOOD OF THE LUNAR NUCLEAR POWER STATION

**Pyshko A.P.<sup>1\*</sup>, Plotnikov A.Yu.<sup>1\*\*</sup>, Son'ko A.V.<sup>1\*\*\*</sup>, Frolov O.V.<sup>1</sup>,  
Eremin A.G.<sup>2\*\*\*\*</sup>, Zaritskii G.A.<sup>2\*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup> *Federal State Unitary Enterprise «State Scientific Centre of the Russian Federation - Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, SSC RF - IPPE, 1, sq. Bondarenko, Obninsk, Kaluzhskaya region, 249033, Russia*

<sup>2</sup> *Red Star, 1A, Elektrolitnyi str., Moscow, 115230, Russia*

\* *e-mail: pyshko@ippe.ru*

\*\* *e-mail: plotnikov@ippe.ru*

\*\*\* *e-mail: sonko@ippe.ru*

\*\*\*\* *e-mail: andreev@redstaratom.ru*

### Abstract

The subject of research is a lunar base with nuclear power station (NPS) containing one or more thermoemission modules (TM). The purpose of current work is determination of the radiation situation in the neighborhood of the lunar NPS. The task of calculating radiation shielding (RS) in the neighborhood of the lunar NPS with one or four TM was solved for the implementation of this goal. The thermoemission nuclear power plant (NPP) with electric power of 50 kW was considered as TM.

Calculation of radiation functionals was produced using the codes which allow to obtain a solution to the transport equation in two-dimensional (RAPID-KONT) and three-dimensional (MCNP) geometries. These codes implement two different methods of solution: a deterministic method and the Monte-Carlo method. Optimum profiles of RS layers were determined by using contribution currents and methods of optimal control theory (the Pontryagin maximum principle). The induced activity of the lunar soil and the fission products activity were calculated with the KAMOD-K code.

The following variant of location of the reactor and RS in mine was selected as a result of designer research.

The depth of the mine is to 3.7 m and the diameter is 1.41 m.

The optimal mutual location of four NPS, substations and lunar base was received for selected variant of the TM placement. The total mass of communications between service module and each of the 6 TMs (two in a reserve) is ~2.1 t, the mass of communications between service module and the lunar base is ~0.4 t, the distance from service module to the lunar base is ~150 m.

The radiation situation in the neighborhood of stopped NPS is mainly determined by the dose of gamma-radiation from the activation of the lunar soil. The dose of gamma radiation from the remaining activity of stopped reactor and the induced activation of the soil is reduced in 5 times by filling the mine by lunar soil.

The obtained results can be used in manned lunar base designing. The number and capacity of each TM is determined by the needs of the consumers.

Thus, it can be stated that the radiation situation in the neighborhood of NPS allows the personnel work at the lunar base and service module when TM is located in the mine.



**Keywords:** nuclear power station, thermoemission module, the Moon, radiation shielding, dose, radiation situation

## References

1. Smitherman D.V. Jr., Dayal V., Dunn II D.J. Architecture for a Mobile Lunar Base Using Lunar Materials, *Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum, American Institute of Physics Conference Proceedings*, 2006, vol. 813, pp. 1022-1029.
2. Mason L.S. A Comparison of Fission Power System Options for Lunar and Mars Surface Applications, *Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum, American Institute of Physics Conference Proceedings*, 2006, vol. 813, pp. 270-280.
3. Pyshko A.P., Plotnikov A.Yu., Son'ko A.V. *Atomnaya energiya*, 2008, vol. 105, no. 2, pp. 72-79.
4. Levchenko V.M, Pyshko A.P., Plotnikov A.Yu. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programm dlya EVM «RAPID-KONT», №2013661631, 11.12.2013* (Certificate of state registration of computer programs «RAPID-KONT», no. 2013661631, 11.12.2013).
5. Voloshchenko A.M. *Materialy VIII Rossiiskoi nauchnoi konferentsii «Radiatsionnaya zashchita i radiatsionnaya bezopasnost' v yadernykh tekhnologiyakh»*, Obninsk, FGUP «GNTs RF-FEI», 2002, pp. 30-33.
6. Pyshko A.P., Plotnikov A.Yu. *Atomnaya energiya*, 2004, vol.97, no. 1, pp. 46-54.
7. Briesmeister J.F. MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport code. Version 4B, *Los Alamos National Laboratory report*, 1997, LA-12625-M, available at: <http://www.http://ru.scribd.com/doc/101105955/Endf-B-Vi-Data-for-Mcnp> (accessed: 11.12.2014).
8. Hendricks J.S., Frankle S.C., Court J.D. ENDF/B-VI Data for MCNP, *Los Alamos National Laboratory report*, 1994, LA-12891, available at: <http://www.http://mightylib.mit.edu/Student%20Materials/books/mcnp4b.pdf> (accessed: 11.12.2014).
9. Frolov O.V. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programm dlya EVM «KAMOD-K», №.2013661632, 11.12.2013* (Certificate of state registration of computer programs «KAMOD-K», no. 2013661632, 11.12.2013).
10. *Sanitarnye pravila SanPiN 2.6.1.2523-09 «Normy radiatsionnoi bezopasnosti (NRB-99/2009)»*, 2009, available at: <http://www.http://nucloweb.jinr.ru/nucloserv/inform/instructions/nrb-99-2009.pdf> (accessed 02.02.2014).
11. *Ogranichenie oblucheniya kosmonavtov pri okolozemnykh kosmicheskikh poletakh, (OOKOKP-2004). Metodicheskie ukazaniya MU 2.6.1. 44-03-2004* (Limitation of exposure of astronauts in near-Earth space flights), Moscow, Federal Agency «Medbioekstrem», 2004, 42 p.