

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ  
ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Шведов Антон Максимович

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
САМОЗАХОРОНЕНИЯ РАО С УЧЕТОМ ПРЯМОГО  
НАГРЕВА ПОРОД ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ**

1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук, с.н.с ИБРАЭ РАН Аветсян Артур Робертович.

Официальные оппоненты:

Защита состоится 0 ..... 2026. г. в ... на заседании диссертационного совета адресу:

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте [www.ibrae.ac.ru/contents/301](http://www.ibrae.ac.ru/contents/301).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

При обращении с радиоактивными отходами атомной энергетики (РАО) серьезную проблему представляет безопасное захоронение долгоживущих альфа-излучающих трансурановых элементов, период полураспада которых достигает сотен и более лет. Суммарная масса подлежащих захоронению трансурановых элементов на единицу производимой энергии составляет  $\sim 40\div 50$  кг/ГВт·год. Учитывая дальнейший рост числа АЭС в мире, количество РАО будет увеличиваться, что делает проблему их вывода из биосферы актуальной и в будущем. В условиях развития широкомасштабной атомной энергетики при суммарной мощности 10000 ГВт масса трансурановых элементов, подлежащих захоронению, может достигать  $4 \cdot 10^5$  кг/год.

При использовании способа захоронения РАО, содержащих трансурановые элементы, в геологических формациях на относительно небольших глубинах ( $\sim$  до 1 км) [1, 2] возникают определенные трудности, в первую очередь, в задачах обоснования безопасности на десятки и сотни лет. В связи с этим рассматриваются и другие способы захоронения РАО, которые позволили бы кардинально решить проблему удаления РАО из биосферы. К числу таких способов можно отнести: удаление в космос на орбиту за пределы Земли, трансмутацию в энергетических реакторах на быстрых нейтронах, выжигание радиоактивных изотопов быстрыми нейтронами в специальных установках, и самозахоронение в геологических формациях на больших глубинах за счет использования собственного тепловыделения содержащихся в РАО радионуклидов.

Способ самозахоронения, при котором для погружения в окружающие породы используется выделяющаяся при радиоактивном распаде энергия, рассматривается в работах [3-10] и др. Существует также ряд патентов (например, [12-14]) на радиоизотопные устройства и способы погружения на основе схемы самозахоронения. Несмотря на то, что исследования в данной области ведутся на протяжении многих десятилетий, способ находится на научно-исследовательской стадии, при этом представляется перспективным для дальнейшего изучения, так как потенциально позволяет осуществлять захоронение РАО на недоступных с помощью других известных способов глубинах ( $>15$  км), обеспечивая многослойный геологический барьер, отделяющий РАО от биосферы. Благодаря возможности погружения глубоко во внутренние слои Земли, способ также представляет интерес и с точки зрения проведения геологических исследований.

В вышеуказанных работах для определения параметров погружения капсул с РАО используются главным образом модели со сферическим представлением капсул, основанные на подходах, описанных в работах С. Эмерммана, Д. Туркотта [11] и С. Логана [3,5].

Представленные в работах [3-10] исследования и радиоизотопные устройства, описание которых содержится в патентах [12-14], предполагают передачу энергии окружающей породе за счет теплопроводности. Недостатком данного теплофизического механизма является поглощение значительной доли выделяемой энергии внутри устройства, использующего для погружения. В настоящей диссертации впервые рассматривается механизм передачи энергии путем прямого нагрева пород излучением. Механизм прямого нагрева пород излучением подразумевает поглощение большей части (>70%) выделяемой содержащимися в устройстве радионуклидами энергии за его пределами, что будет способствовать повышению надежности способа самозахоронения. Исследовано погружение с использованием механизма прямого нагрева пород излучением в породах гранит и соль, а также во льду. Разработана теплофизическая модель радиоизотопного устройства для погружения (далее – устройство) в граните и соли на основе прямого нагрева пород излучением, сформулированы критерии реализации механизма прямого нагрева пород излучением, выбраны тепловыделяющие радионуклиды, получены аналитические выражения для определения распределения температур при погружении в граните и соли, выполнены численные расчеты с целью определения скорости погружения устройства в граните, соли и во льду.

Сказанное выше позволяет считать тему диссертации актуальной как с научной, так и практической точки зрения.

### **Цель работы.**

Расчетно-теоретическое исследование способа изоляции радиоактивных отходов (РАО) методом самопогружения на основе прямого нагрева пород излучением в гранитах, солях и во льду.

Задачами работы являются:

1. Разработка теплофизической схемы плоского радиоизотопного устройства для захоронения РАО атомной энергетики и погружения в породах.
2. Разработка теплофизической модели погружения плоского радиоизотопного устройства с учетом механизма прямого нагрева пород излучением.
3. Выработка критериев для реализации механизма прямого нагрева пород излучением. Проведение численных расчетов самопоглощения энергии гамма-излучения в шарообразных тепловыделяющих элементах устройства.
4. Определение распределения энерговыделения за счет поглощения гамма-излучения плоского устройства с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$  в породах гранит, соль и во льду.
5. Определение распределения температур в породах гранит и соль при погружении устройства с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$ .

6. Определение скорости погружения устройства в породах гранит, соль и во льду.

**Научная новизна.** Автором впервые:

1. Предложены теплофизическая схема плоского радиоизотопного устройства и механизм передачи энергии окружающей породе путем прямого нагрева излучением. Разработана теплофизическая модель погружения устройства с учетом прямого нагрева пород излучением.
2. Проведено расчетно-теоретическое исследование способа погружения на основе прямого нагрева пород излучением для захоронения РАО и погружения в породах гранит, соль и во льду. Сформулированы критерии для реализации механизма прямого нагрева пород излучением и выбора тепловыделяющих радионуклидов. Проведены численные расчеты самопоглощения энергии в шарообразных тепловыделяющих элементах устройства.
3. Получены выражения для определения распределения энерговыделения за счет поглощения гамма-излучения от плоского устройства с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$  в породах гранит, соль и во льду. Получены аналитические выражения для определения распределения температур в породах гранит и соль при погружении устройства. Получены распределения температур в породах гранит и соль при погружении устройства. Получено выражение для определения скорости погружения устройства в породах гранит и соль. Проведены расчеты с целью определения скорости погружения в породах гранит, соль и во льду в зависимости от мощности энерговыделения за счет радиоактивного распада тепловыделяющих радионуклидов в устройстве.

**Научная и практическая значимость:**

Полученные результаты направлены на решение проблемы безопасного захоронения РАО атомной энергетики, в том числе содержащих трансурановые элементы. Способ самозахоронения РАО на основе механизма прямого нагрева пород излучением может быть использован для захоронения РАО на больших глубинах, что практически исключает возврат радионуклидов обратно в биосферу. Также рассматриваемые в работе устройство и способ погружения могут быть использованы для проведения исследований глубоких геологических формаций. Результаты могут быть непосредственно использованы при создании устройств на основе механизма прямого нагрева пород излучением, моделировании процесса их погружения в окружающих породах и определении параметров погружения.

**Основные результаты, выносимые на защиту:**

1. Теплофизическая схема плоского радиоизотопного устройства и механизм прямого нагрева излучением. Критерии реализации механизма прямого нагрева пород излучением и выбора тепловыделяющих радионуклидов.
2. Теплофизическая модель одномерного движения плоского устройства с учетом переноса и поглощения гамма-излучения в геологических породах.
3. Аналитические выражения для определения распределения температур при погружении устройства в породах гранит и соль. Распределения температур при погружении устройства в породах гранит и соль. Расчеты скорости погружения в породах гранит, соль и в толщах льда в зависимости от мощности тепловыделения устройства.

**Личный вклад.** Автором лично получены следующие результаты, изложенные в диссертации:

1. Разработана теплофизическая схема устройства для погружения в породах гранит и соль. Получены оценки самопоглощения энергии в шарообразных тепловыделяющих элементах устройства. Выработаны критерии для реализации механизма прямого нагрева пород излучением и выбора тепловыделяющих радионуклидов.
2. Получены выражения для определения распределения энерговыделения за счет поглощения гамма-излучения от плоского устройства с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$  в породах гранит, соль и во льду. Получены аналитические выражения для определения распределения температур при погружении устройства в породах гранит и соль.
3. Получены распределения температур при погружении устройства в породах гранит и соль на основе аналитических выражений. Проведены численные расчеты с целью определения распределения температур и скорости погружения в граните с учетом зависимости теплофизических свойств от температуры. В результате проведенных расчетов получены значения скорости погружения устройства в породах гранит, соль и во льду и соответствующие уровни мощности энерговыделения за счет радиоактивного распада радионуклида  $^{60}\text{Co}$ .

**Достоверность результатов и выводов диссертации** базируется на применении современных методов математического моделирования, сравнении полученных результатов с данными других авторов, на согласии аналитических результатов с качественными оценками.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы были представлены на конференциях, XVI, XVII, XVIII Школах молодых ученых ИБРАЭ РАН,

семинарах лабораторий №№ 91, 161 ИБРАЭ РАН, Теоретического отдела им. Л.М. Бибермана ОИВТ РАН.

Получен патент изобретение – Арутюнян Р.В., Шведов А.М. Радиоизотопное устройство для погружения в геологические формации земной коры / Пат. RU 2601288 С1. Российская Федерация, МПК G21F 9/24 (2006.01); патентообладатель ИБРАЭ РАН. - № 2015142152/07; заявл. 05.10.15; опубл. 27.10.16, Бюл. № 30.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 печатных работы в изданиях из списка, рекомендованного ВАК Минобрнауки России, и 1 патент.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержит 36 иллюстраци<sup>1</sup>. Общий объем диссертации составляет 109 страницы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы основные задачи работы, перечислены результаты, выносимые на защиту, описана новизна полученных результатов.

**В Главе 1** представлен обзор публикаций и патентов, касающихся способа самозахоронения РАО атомной энергетики и радиоизотопных устройств погружения путем расплавления пород.

В настоящее время существует достаточно большое количество работ и патентов, например, [1-14], где рассматриваются устройства погружения на основе радионуклидов с передачей энергии окружающей породе за счет механизма теплопроводности. В работе [3] описана концепция капсулы, проплавляющей породы на основе использования тепла, выделяемого в результате радиоактивного распада радионуклидов, содержащихся в РАО в контейнере. Погружаясь за счет гравитации достигается глубинное захоронение. Расплав породы остывает за капсулой, обеспечивая изоляцию от окружающей среды. Представлен энергетический и гидродинамический критерии для определения скорости погружения. Получено выражение для порогового значения удельной мощности тепловыделения капсулы. Проведены расчеты параметров погружения для различных видов радиоактивных отходов, включая продукты деления, актиниды и радионуклиды Sr и Cs, сферических капсул радиуса 25, 50 и 100 см, пород базальт и гранит. Показано, что концепция самопогружения является потенциально реализуемой. В [5] также рассматривается схема самопогружения путем расплавления пород и ее усовершенствования, предложенные Бялко [4], для захоронения радиоактивных отходов с относительно невысокой плотностью тепловыделения. С помощью кода Rockmelt получены численные оценки параметров погружения в граните для различных диаметров капсул и плотностей тепловыделения РАО. В [6] рассматриваются цилиндрические контейнеры для осуществления погружения. Сделан вывод о значительном увеличении геологический барьера для защиты от выхода радионуклидов обратно в биосферу при использовании данной схемы по сравнению с другими известными методами. В [7] аналогично самозахоронению РАО рассматривается самозахоронение отработавших закрытых радиоактивных источников, используемых в медицине, промышленности, исследовательской деятельности и других областях. Перед погружением необходимое количество источников помещается в металлические капсулы. Оценены основные параметры погружения. Авторами [8] предложено размещение в капсулу для самопогружения наряду с РАО мощного тепловыделяющего нуклида с целью достижения необходимого тепловыделения. Приводятся оценки параметров для самопогружения капсулы из вольфрама, содержащей радионуклид  $^{60}\text{Co}$ , в граните. Рассматриваются вопросы исследования внутренних слоев Земли с

помощью устройств самопогружения. В частности, упоминается о том, что детектирование и анализ акустических сигналов при плавлении и кристаллизации пород может дать информацию о глубинных слоях Земли, которая не доступна с помощью прямого отбора проб, а также дополнить данные других дистанционных методов геофизического мониторинга. Согласно [9] в различных странах уже ведутся исследования возможности применения самопогружающихся капсул для сверхглубокой геологической разведки, в том числе для достижения границы Мохоровича (разрыв Мохо). Интерес к исследованиям связан с возможностью получения информации, касающейся предотвращения землетрясений, а также возможностью обнаружения запасов топлива. В [10] анализируется целесообразность и пригодность схемы самозахоронения в сравнении с глубинным геологическим захоронением. Для сферических контейнеров различного радиуса рассчитаны параметры погружения, такие как скорость и глубина погружения. В результате анализа схема самозахоронения признается целесообразной и более безопасной, потенциально обеспечивая многослойный барьер, изолирующий РАО от возвращения в биосферу.

Существует ряд патентов на способы и устройства, основанные на использовании энергии радиоактивного распада для проплавления пород.

В патенте [12] предложена погружающаяся тепловыделяющая капсула с РАО, которая выполняется преимущественно сферической формы диаметром  $< 15$  см. Для увеличения тепловыделения предлагается добавлять изотопы  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$  в смесь РАО, что позволяет снизить размеры капсулы и уменьшить вероятность ее преждевременного разрушения.

Авторами патентов [13,14] предложен вариант конструкции устройства в виде плоского тепловыделяющего элемента, либо плоской пространственной тепловыделяющей структуры с механически связанными тепловыделяющими элементами малого размера. При этом, предполагается раздельное размещение радионуклидов, обеспечивающих необходимое для погружения энерговыделение, и подлежащих захоронению РАО. Тепловыделяющие элементы заполняются радионуклидами с высоким удельным энерговыделением (например,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ), а РАО, включая долгоживущие продукты деления и изотопы трансурановых элементов, размещаются в отдельных закрепляемых к устройству контейнерах. Такая конструкция приводит к уменьшению температуры корпуса контейнера и элементов устройства, а в результате повышения эффективности использования выделяемой радионуклидами энергии увеличивается скорость погружения, объем и масса РАО и/или исследовательского оборудования. Передача энергии окружающей породе происходит преимущественно за счет механизма теплопроводности. В случае использования устройства для проведения исследований, соответствующее оборудование может размещаться в отдельных контейнерах, закрепляемых к устройству со стороны, противоположной движению.

В рассмотренных выше работах и патентах механизмом передачи тепла от капсулы (либо тепловыделяющей структуры) к окружающей породе является теплопроводность, что приводит к высоким уровням максимальных температур и температурных градиентов в элементах конструкции. Температура в центре капсул может достигать 2000-3000 °С. В данной работе рассматривается механизм передачи энергии путем прямого нагрева пород излучением в радиоизотопных устройствах, реализующих способ самозахоронения. Нагрев пород с использованием излучения с высокой проникающей способностью, когда большая часть (>70%) энергии, выделяемой содержащимися в устройстве радионуклидами, будет поглощаться за его пределами, позволит снизить температурные нагрузки на элементы устройства и тем самым повысить надежность.

В **Главе 2** представлена теплофизическая схема радиоизотопного устройства погружения на основе механизма прямого нагрева пород излучением. Сформулированы критерии для реализации механизма прямого нагрева пород излучением и выбора тепловыделяющих радионуклидов. Приведены результаты расчета поглощения энергии в шарообразных тепловыделяющих элементах устройства. Представлены результаты расчета распределения энерговыделения в граните, соли и во льду за счет поглощения гамма-излучения. Получен источник объемного тепловыделения от плоского устройства с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$ .

**Теплофизическая схема радиоизотопного устройства.** Радиоизотопное устройство, с помощью которого осуществляется погружение на основе механизма прямого нагрева пород, должно в первую очередь обеспечивать условия реализации данного механизма. Большая часть (>30%) выделяемой при радиоактивном распаде радионуклидов энергии должна поглощаться за пределами устройства в окружающей породе. Более подробно условия реализации прямого нагрева пород сформулированы ниже. Данные условия накладывают ограничения на форму устройства и выбор тепловыделяющих радионуклидов, обеспечивающих проплавление пород. Предание устройству формы близкой к плоской позволяет уменьшить поглощение энергии в элементах конструкции в направлении погружения. Так устройство может представлять собой плоскую симметричную тепловыделяющую структуру, состоящую из шаровых тепловыделяющих элементов малого радиуса (около 1 см), центры которых лежат в одной плоскости [15]. При этом, предполагается, что тепловыделяющие элементы расположены друг от друга на одинаковом расстоянии и соединены между собой соответствующими конструкционными элементами.

Для обеспечения выхода излучения за пределы устройства в качестве тепловыделяющих радионуклидов целесообразно использовать гамма-излучатели с высокими значениями удельной активности, энергии и выхода гамма-квантов на один акт распада. Необходимое для погружения

тепловыделение должно поддерживаться в течение длительного времени (десятки лет), что накладывает ограничения на время жизни тепловыделяющих радионуклидов и исключает из рассмотрения короткоживущие радионуклиды. Основные аспекты, касающиеся выбора тепловыделяющих радионуклидов, также указаны ниже в соответствующем подразделе.

Тепловыделяющие радионуклиды отделяет от окружающей среды (горной породы и ее расплава) оболочка. Материал оболочки должен выдерживать высокие температуры, превышающие температуру плавления окружающих пород ( $>1000$  °C), этим условиям удовлетворяют, например, металлы W, Mo, Ti и др.

Количество тепловыделяющих радионуклидов в тепловыделяющих элементах определяется из условия обеспечения необходимого тепловыделения для погружения в породах с заданной скоростью.

Процесс погружения устройства осуществляется следующим образом. При радиоактивном распаде радионуклидов, содержащихся в устройстве, испускается излучение, которое поглощается преимущественно в окружающей горной породе вблизи устройства. Интенсивность излучения такова, что обеспечивается нагрев породы выше температуры плавления, в результате вблизи поверхности устройства образуется тонкий слой расплава породы. Для погружения устройства в расплаве пород должно выполняться условие превышения средней плотности устройства плотности пород. При выполнении данного условия, устройство под действием силы тяжести вытесняет жидкий расплав и перемещается вглубь породы. Для обеспечения протекания образующегося расплава в вертикальном направлении необходимо предусмотреть каналы. В тепловыделяющей структуре, описанной в патенте [15], такими каналами служат зазоры между шаровыми тепловыделяющими элементами. В результате перетекания расплава через каналы над верхней поверхностью устройства зона образуется ограниченная зона расплава. Спустя время, необходимое для застывания расплава, в скважине над устройством образуется зона затвердевшего расплава пород, служащая надежным барьером от попадания радионуклидов в биосферу.

Для концентрации излучаемой энергии в направлении погружения устройства (под нижней поверхностью) используется квазиодномерный режим энерговыделения. Осуществление данного режима связано с выбором определенного соотношения поперечных и вертикальных размеров устройства. Необходимое соотношение можно получить для модели устройства в виде цилиндра диаметром  $D$  и высотой  $H$ , исходя из следующего условия: поток излучаемой энергии со стороны нижней поверхности устройства должен существенно превышать поток энергии, излучаемой через боковую поверхность. Предполагалось, что поверхностная плотность потока  $q$  одинакова по всей внешней поверхности устройства. В результате было получено:

$$Q_H > Q_B; Q_H = qS_H = q \cdot \pi D^2/4; Q_B = q \cdot S_B = q \cdot \pi D H \quad (1),$$

где  $Q_H$  – поток энергии через нижнюю поверхность устройства;  $Q_B$  – поток через боковую поверхность. Таким образом, из соотношения  $Q_H > Q_B$  следует, что  $S_H > S_B$ , откуда получим условие выбора размеров устройства для осуществления квазиодномерного режима в виде:  $D > 4H$ .

До начала процесса погружения устройства подлежащие захоронению РАО, переведенные в твердую форму, размещаются в отдельных контейнерах, закрепляемых к устройству со стороны верхней поверхности. Масса захораниваемых за одну кампанию устройства РАО может достигать нескольких тонн. Также в отдельных контейнерах может быть размещено оборудование для проведения геологических исследований.

При погружении устройства с РАО на значительную глубину (десятки километров) вокруг устройства формируется геологический барьер, надежно защищающий от возврата в биосферу содержащихся в контейнерах и самом устройстве радионуклидов.

Предполагается, что скорость погружения составляет около 1 км/год, таким образом, процесс погружения может продолжаться несколько десятков лет. Различные способы отслеживания устройства в ходе погружения описаны в [8,9,15].

**Механизм прямого нагрева окружающих пород излучением.** Авторами данной работы предлагается использовать механизм прямого нагрева пород излучением для передачи энергии окружающей породе. Способ погружения на основе данного механизма раскрыт в патенте [15]. Под прямым нагревом излучением подразумевается перенос излучения с его последующим поглощением в материале окружающей породы. Реализация данного механизма предполагает выход большей части излучения и, соответственно, энергии за пределы устройства, что будет способствовать снижению температурных нагрузок на элементы устройства и повышению его надежности. Обеспечить данное условие можно за счет предания устройству формы близкой к плоской и использования радионуклидов, обладающих высоким удельным энерговыделением в результате радиоактивного распада и испускающих излучение с высокой проникающей способностью. К радионуклидам с такими характеристиками можно отнести гамма-излучатели с высокими значениями энергии и выхода гамма-квантов на распад. Кроме того, период полураспада должен быть таким, чтобы обеспечить высокую удельную активность, а, следовательно, и мощность энерговыделения, но при этом радионуклиды должны обладать достаточным временем жизни для поддержания требуемого уровня мощности в течение всего длительного периода погружения.

**Выбор тепловыделяющих радионуклидов.** Среди содержащихся в РАО атомной энергетики нуклидов можно отметить  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ , обладающие высокими значениями энергии  $\gamma$ -излучения и удельным энерговыделением (см. таблицу 1) Промежуточные значения времени жизни данных нуклидов (период полураспада ~ годы и десятки лет) позволяют в течение длительного

срока обеспечивать требуемое для погружения на большую глубину энерговыделение.

Энерговыделение на единицу объема  $^{60}\text{Co}$  примерно в 160 раз больше, чем для  $^{137}\text{Cs}$ . Таким образом, с точки зрения создания устройства небольшой толщины с малым поглощением излучения выбор  $^{60}\text{Co}$  в качестве основного источника тепловыделения более предпочтителен. Как показывают оценки, при использовании  $^{137}\text{Cs}$  условие преимущественного поглощения  $\gamma$ -излучения в окружающем материале оказывается трудновыполнимым, доля поглощения энергии  $\gamma$ -излучения в устройстве составляет, как правило, более 30% при скорости погружения около 1 км/год.

Таблица 1. Характеристики гамма-излучающих нуклидов, содержащихся в РАО, рассматриваемых в качестве источников тепловыделения для прямого нагрева пород.

Нуклид	Период д полу- распа- да, годы	Удельная активность		Выход энергии на распад МэВ/расп	Энерговы- деление на единицу активности Вт/Бк	Удельное энерговыделение		
		Бк/г	Бк/см <sup>3</sup>			Вт/г	Вт/см <sup>3</sup>	ГДж/г
$^{60}\text{Co}$	5,27	$4,18 \cdot 10^1_3$	$3,72 \cdot 10^1_4$	2,504	$4,01 \cdot 10^{-13}$	16,8	149,2	4,0
$^{137}\text{Cs}$ (CsCl)	30,17	$2,55 \cdot 10^1_2$	$1,01 \cdot 10^1_3$	0,563	$9,00 \cdot 10^{-14}$	0,2	0,9	0,3

### Поглощение энергии излучения в тепловыделяющих элементах.

Были выполнены расчеты для оценки самопоглощения энергии, выделяемой при радиоактивном распаде тепловыделяющих нуклидов, в материалах шарообразных тепловыделяющих элементов. Расчеты выполнялись с помощью метода Монте-Карло. На рисунке 1 приведена полученная зависимость доли самопоглощения  $\delta$ , определяемой как отношение поглощенной энергии в материале источника к полной выделяемой источником энергии, от радиуса сферы R, равномерно заполненной радионуклидом  $^{60}\text{Co}$ . Радиус указан в длинах свободного пробега нерассеянного гамма-излучения (дсп).

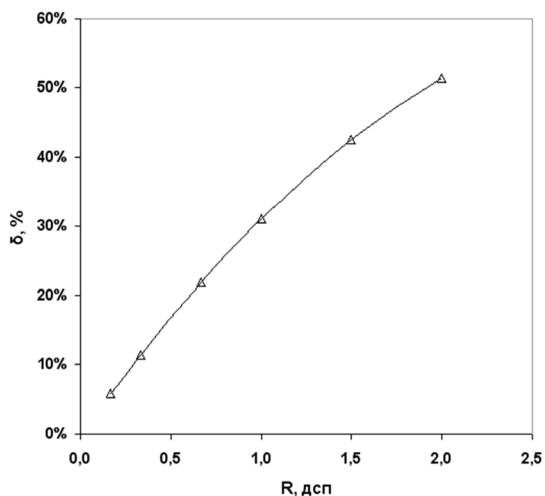


Рисунок 1 – Доля самопоглощения энергии гамма-излучения в объемных источниках в виде шаров различного радиуса, равномерно заполненных радионуклидом  $^{60}\text{Co}$ .

Также были выполнены расчеты самопоглощения энергии в материалах оболочки тепловыделяющих элементов молибден и вольфрам.

Следует отметить, что кривые  $\delta(R)$ , где  $R$  выражено в терминах длин свободного пробега, для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$  практически совпадают. При этом, доля самопоглощения в шаровых тепловыделяющих элементах для устройства с  $^{137}\text{Cs}$ , будет значительно выше, чем для устройства с  $^{60}\text{Co}$ , так как вследствие меньшей мощности удельного энерговыделения требуется существенно большее количество  $^{137}\text{Cs}$  для достижения тех же значений скорости погружения, и, соответственно, больший размер тепловыделяющих элементов. Было получено, что использование  $^{137}\text{Cs}$  в качестве тепловыделяющего нуклида не представляется целесообразным, так как значение  $\delta$ , как правило, оказывается  $>30\%$ .

В результате проведенных расчетов самопоглощения энергии были получены следующие условия для выбора размеров шарообразных тепловыделяющих элементов:

$$R < 0,3\lambda_n; \quad d_o < 0,3\lambda_o, \quad (2)$$

где  $d_o$  – толщина оболочки тепловыделяющего элемента;  $\lambda_n, \lambda_o$  – длины свободного пробега нерассеянного гамма-излучения в материале, заполняющем полость тепловыделяющего элемента, и в материале оболочки, соответственно.

Расчеты показали, что тепловыделяющие элементы устройства с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$  могут быть выполнены в виде шаров радиусом около 1 см (0,7 см – радиус полости, 0,3 см – толщина оболочки, материал оболочки – молибден).

**Распределение энерговыделения в окружающих породах в результате поглощения гамма-излучения.** Были проведены расчеты зависимости энерговыделения в окружающих породах от расстояния от точечного изотропного источника гамма-излучения на основе радионуклида  $^{60}\text{Co}$ . Мощность удельного энерговыделения  $q(r)$  на расстоянии  $r$  от источника определялась методом Монте-Карло путем расчета энергетического распределения плотности потока гамма-квантов  $\varphi(r, E)$  с последующим интегрированием по энергии  $E$  произведения  $\varphi(r, E) \cdot E \cdot \mu_{en}(E)$ , где  $\mu_{en}(E)$  – массовый коэффициент поглощения энергии гамма-квантов в данном материале.

Полученные в результате расчета зависимости  $q(r)$  аппроксимировались функцией вида  $(1/r) \cdot \sum_{i=1}^2 a_i' \cdot \exp(-b_i' r)$ , где коэффициенты  $a_i'$  и  $b_i'$  для данной энергии гамма-излучения и различных материалов пород определялись методом наименьших квадратов.

Анализ полученных интегральных зависимостей энерговыделения в граните и соли от расстояния от точечного источника показал, что 90% выделяемой энергии поглощается в пределах объема, ограниченного сферой с центром в месте расположения источника радиусом 4 длины свободного пробега нерассеянного гамма-излучения, что составляет 27 и 33 см для материалов гранит и соль, соответственно.

В результате интегрирования зависимостей  $q(r)$  по поверхности источника были получены оценки пространственного распределения удельного энерговыделения  $Q(z)$  от плоского бесконечного источника в виде

$$Q(z) = A_s \cdot Q_\gamma \cdot \sum_{i=1}^2 a_i \cdot \exp(-b_i z),$$

где  $z$  – расстояние от источника,  $A_s$  –

поверхностная активность радионуклида в источнике ( $\text{Бк}/\text{м}^2$ ),  $Q_\gamma$  – мощность энерговыделения на единицу активности данного радионуклида ( $\text{Вт}/\text{Бк}$ ). Предполагалось, что активность распределена по поверхности равномерно. Константы  $a_i$  и  $b_i$  ( $1/\text{м}$ ) для различных поглощающих материалов и гамма-излучения  $^{60}\text{Co}$  составили: гранит –  $a_1 = 6,13$ ;  $b_1 = 14,67$ ;  $a_2 = 6,94$ ;  $b_2 = 84,17$ ; соль –  $a_1 = 4,97$ ;  $b_1 = 12,00$ ;  $a_2 = 5,82$ ;  $b_2 = 67,58$ .

В **Главе 3** представлена теплофизическая модель устройства. Получены аналитические выражения для определения распределения температур в окружающих породах. Получены распределения температур при погружении

устройства в граните и соли. Представлены результаты расчетов скорости погружения в граните, соли и во льду в зависимости от мощности тепловыделения устройства.

**Теплофизическая модель устройства для погружения в породах.** В рамках принятой модели использовалось представление погружающегося устройства в виде плоскости с равномерно распределенным по поверхности радионуклидом  $^{60}\text{Co}$ . Предполагалось, что устройство опускается вглубь породы с постоянной скоростью. Погружение устройства осуществляется в результате нагрева и оплавления окружающего материала с последующим вытеснением легкого расплава более тяжелым устройством. Считалось, что движение имеет одномерный характер вследствие малости тепловых потоков в боковом направлении (устройство имеет плоскую форму). В модели для описания движения устройства и определения температурных полей в окружающих материалах пород использовались подходы, изложенные в [17-19]. Схематично погружение устройства в соответствии с используемой моделью показано на рисунке 2.

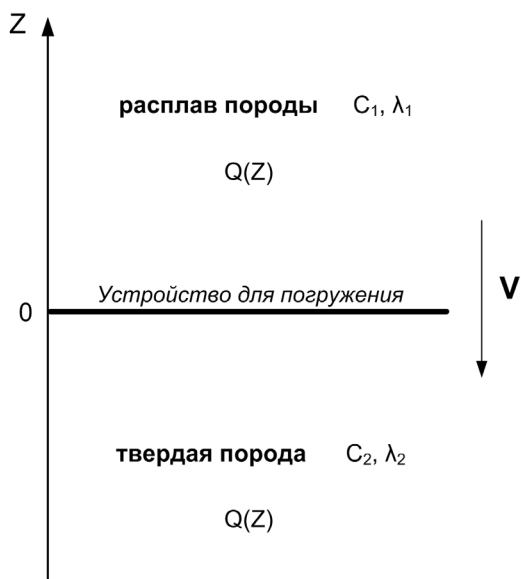


Рисунок 2 – Схема погружения устройства на основе прямого нагрева пород излучением

Выражения для определения скорости погружения и распределения температур в породах были получены из системы уравнений теплопроводности в

одномерном квазистационарном приближении [17-19], записанной в системе координат, движущейся вместе с устройством:

$$\begin{cases} C_1 V \frac{dT_1(z)}{dz} = \lambda_1 \frac{d^2 T_1(z)}{dz^2} + Q(z), & z \geq 0 \\ C_2 V \frac{dT_2(z)}{dz} = \lambda_2 \frac{d^2 T_2(z)}{dz^2} + Q(z), & z < 0 \end{cases} \quad (3),$$

с граничными условиями:  $T_1|_{z=0} = T_2|_{z=0} = T_{nl}$ ;  $T_2|_{z=-\infty} = T_{cp}$ ;

$-\lambda_1 \frac{dT_1}{dz} \Big|_{z=0} + \lambda_2 \frac{dT_2}{dz} \Big|_{z=0} = \rho L V$ . В системе уравнений (3) используются

следующие обозначения:  $T_i(z)$  – пространственное распределение температуры в  $i$ -й зоне;  $V$  – скорость погружения устройства;  $C_i$ ,  $\lambda_i$  – объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности  $i$ -й зоны,  $i = 1$  соответствует зоне расплава породы,  $i = 2$  – зона с расплавляемой породой;  $L$  – удельная теплота плавления;  $\rho$  – плотность твердого материала;  $T_{cp}$  – температура окружающей породы при  $z \rightarrow -\infty$ ;  $T_{nl}$  – температура плавления окружающей породы.

Механизм прямого нагрева пород излучением предполагает, что тепловыделение в окружающей породе обусловлено поглощением гамма-излучения, испускаемого тепловыделяющим радионуклидом. Используя полученные результаты для распределения тепловыделения в породах от плоского источника гамма-излучения, источник объемного тепловыделения в системе (3) задается в виде:  $Q(z) = \sum_{i=1}^2 A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i \cdot \exp(-b_i |z|)$ ,  $-\infty < z < \infty$ , где  $A_s$  –

активность радионуклида на единицу поверхности устройства;  $Q_\gamma$  – мощность энерговыделения на единицу активности данного радионуклида. Решая (3) можно получить выражения для определения распределения температур в окружающих породах и скорости погружения.

**Распределение температур и скорость погружения устройства в окружающих породах.** Из решения системы уравнений (3) были получены следующие выражения для определения распределения температур:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(z) = -\sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i \cdot \exp(-b_i z)}{\lambda_1 b_i^2 + VC_1 b_i} + \sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i}{\lambda_1 b_i^2 + VC_1 b_i} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_1 b_i}{VC_2}\right) + \\ + \sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i}{\lambda_2 b_i^2 - VC_2 b_i} \cdot \left(\frac{\lambda_2 b_i}{VC_2} - 1\right) + \frac{\rho \cdot L}{C_2} + T_{cp}, \quad z \geq 0 \\ T_2(z) = \left[ \sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i}{\lambda_1 b_i^2 + VC_1 b_i} \cdot \left(\frac{\lambda_1 b_i}{VC_2}\right) + \sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i}{\lambda_2 b_i^2 - VC_2 b_i} \cdot \left(\frac{\lambda_2 b_i}{VC_2}\right) + \frac{\rho \cdot L}{C_2} \right] \times \\ \times \exp\left(\frac{C_2 V}{\lambda_2} z\right) - \sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i \cdot \exp(b_i z)}{\lambda_2 b_i^2 - VC_2 b_i} + T_{cp}, \quad z < 0 \end{array} \right. \quad (4).$$

Вводя обозначения:  $\theta_i(z) = \frac{T_i(z) - T_{cp}}{(T_{nl} - T_{cp})}$ ;  $\Theta_{li} = \sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i}{\lambda_1 b_i^2 \cdot (T_{nl} - T_{cp})}$ ;

$\Theta_{2i} = \sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i}{\lambda_2 b_i^2 \cdot (T_{nl} - T_{cp})}$ ;  $Z_i = b_i z$ ;  $X_{1i} = \frac{VC_1}{\lambda_1 b_i}$ ;  $X_{2i} = \frac{VC_2}{\lambda_2 b_i}$ ;  $X'_i = \frac{VC_2}{\lambda_1 b_i}$ ;

$H = \frac{\rho \cdot L}{C_2 \cdot (T_{nl} - T_{cp})}$  выражения (4) могут быть представлены в безразмерном

виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_1(z) = \sum_{i=1}^2 \frac{\Theta_{1i}}{1 + X_{1i}} \left(1 + \frac{1}{X'_i} - \exp(-Z_i)\right) + \sum_{i=1}^2 \frac{\Theta_{2i}}{1 - X_{2i}} \left(\frac{1}{X_{2i}} - 1\right) + H, \quad z \geq 0 \\ \theta_2(z) = \left[ \sum_{i=1}^2 \frac{\Theta_{1i}}{1 + X_{1i}} \cdot \left(\frac{1}{X'_i}\right) + \sum_{i=1}^2 \frac{\Theta_{2i}}{1 - X_{2i}} \cdot \left(\frac{1}{X_{2i}}\right) + H \right] \cdot \exp(X_{2i} Z_i) - \\ - \sum_{i=1}^2 \frac{\Theta_{2i} \cdot \exp(Z_i)}{1 - X_{2i}}, \quad z < 0 \end{array} \right. \quad (5),$$

Из решения (3) было получено трансцендентное уравнение для определения скорости погружения устройства  $V$ :

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i}{\lambda_1 b_i^2 + VC_1 b_i} \cdot \frac{1}{(T_{ni} - T_{cp})} \cdot \left( \frac{\lambda_1 b_i}{VC_2} \right) + \\
& + \sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i}{\lambda_2 b_i^2 - VC_2 b_i} \cdot \frac{1}{(T_{ni} - T_{cp})} \cdot \left( \frac{\lambda_2 b_i}{VC_2} - 1 \right) + \\
& + \left( \frac{\rho \cdot L}{C_2 \cdot (T_{ni} - T_{cp})} - 1 \right) = 0
\end{aligned} \tag{6}$$

В безразмерном виде (6) может быть записано следующим образом:

$$\sum_{i=1}^2 \frac{\Theta_i}{1 + X_{1i}} \cdot \left( \frac{1}{X'_i} \right) + \sum_{i=1}^2 \frac{\Theta_i}{1 - X_{2i}} \cdot \left( \frac{1}{X_{2i}} - 1 \right) = 1 - H, \tag{7}$$

Из (6) можно получить упрощенное выражение для определения скорости погружения:

$$V = \frac{A_s \cdot Q_\gamma}{2 \cdot [C_2 \cdot (T_{ni} - T_{cp}) + L \cdot \rho]} \tag{8}$$

означающее, что поток энергии  $\frac{A_s \cdot Q_\gamma}{2}$ , выделяемой в единицу времени в направлении опускания устройства, расходуется на нагрев окружающего материала пород до температуры плавления и плавление породы.

Полученные с помощью выражения (5) распределения температур при погружении в граните и соли приведены на рисунке 3. При проведении расчетов использовались данные о константах [20-23].

Расчеты, выполненные для  $^{60}\text{Co}$  в качестве тепловыделяющего радионуклида, показали, что для достижения скоростей погружения в граните и соли около нескольких километров в год необходима мощность тепловыделения  $2 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ .

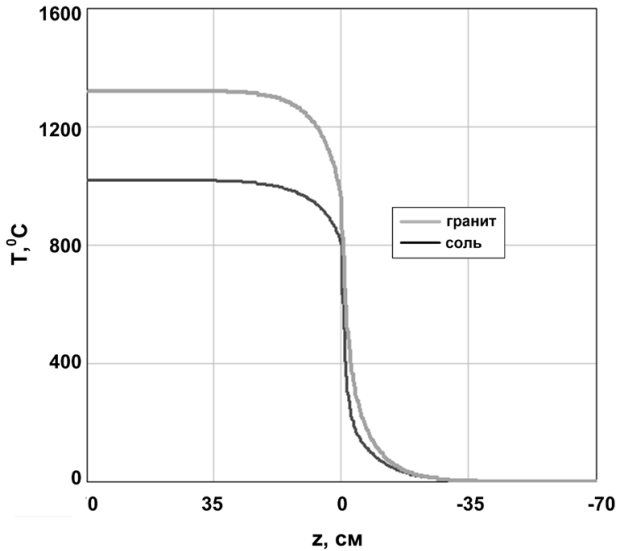


Рисунок 3 – Распределение температур в материалах гранит и соль при мощности тепловыделения устройства  $2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>

Также было выполнено численное решение системы уравнений (3) с коэффициентами теплопроводности и температуропроводности, зависящими от температуры. Зависимости коэффициентов теплопроводности и температуропроводности от температуры брались по данным работы [24]. Была разработана численная схема решения, в соответствии которой на каждом шаге по  $z$  производилось определение значений производной  $\frac{dT_i}{dz}$  в конце данного

отрезка путем решения соответствующего уравнения системы методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Используя значения производной на границах отрезка путем интегрирования определялось значение температуры, соответствующее данному отрезку. В качестве исходного условия для решения бралось равенство нулю производной при  $z \rightarrow \infty$  (условие ограниченности решения). Удовлетворение условиям на границе и равенству температуры  $T_2$  при  $z \rightarrow \infty$  значению  $T_{cp}$  достигалось путем варьирования значений скорости  $V$  и температуры  $T_1$  при  $z \rightarrow \infty$ . Начальные значения скорости  $V$  и температуры  $T_1$  при  $z \rightarrow \infty$  брались на основе полученного решения (5) и (6) со средними значениями коэффициентов, описывающих теплофизические свойства среды. Полученные в результате численного решения системы (3) распределения температур представлены на рисунке 4. Соответствующие значения активности Со-60 на графике указаны в единицах Бк/м<sup>2</sup>.

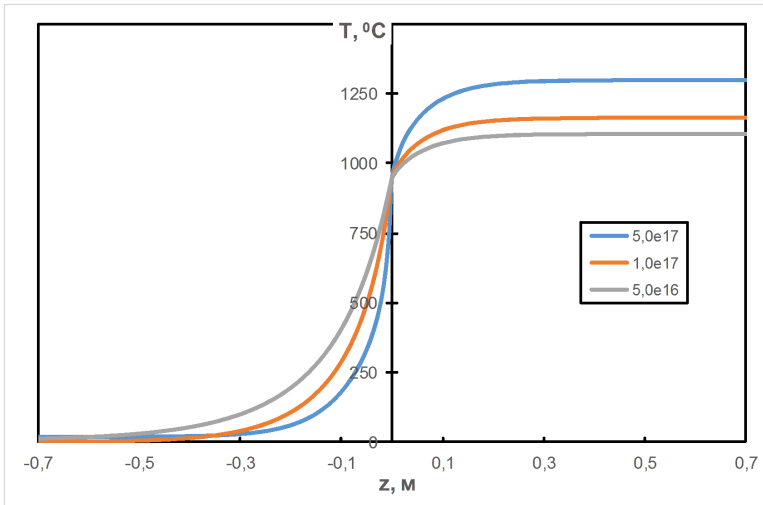


Рисунок 4. Распределение температур в граните при погружении радиоизотопного устройства с различной средней поверхностной активностью Co-60.

Кривым на графиках, представленных на рисунке 4, соответствуют значения скорости погружения  $V$ :  $5,74 \cdot 10^{-6}$ ;  $1,07 \cdot 10^{-5}$  и  $4,07 \cdot 10^{-5}$  м/с.

**Погружение во льду.** Для погружения в толщи льда с использованием механизма прямого нагрева излучением рассматривалось шарообразное устройство. Предполагалось, что радионуклид  $^{60}\text{Co}$ , обеспечивающий необходимое тепловыделение для проплавления льда, размещается в шаровом слое, заключенном между внутренней и внешней оболочкой устройства. В расчетах принималось, что толщина внутренней и внешней оболочек, выполненных из тугоплавких металлов, составляет 3 мм; масса тепловыделяющего радионуклида в шаровом слое определялась требуемой мощностью тепловыделения.

Мощность тепловыделения, необходимая для погружения со скоростью  $V$  [10], определялась с помощью выражения:

$$Q = 2 \cdot V \cdot \pi R_E^2 \cdot [C \cdot (T_{пл} - T_{cp}) + L \cdot \rho], \quad (9)$$

где  $C$  – объемная теплоемкость;  $T_{пл}$  – температура плавления окружающей породы;  $T_{cp}$  – температура окружающей среды;  $L$  – удельная теплота плавления и  $\rho$  – плотность льда. При использовании выражения (9) радиус  $R_E$ , соответствующий области, в пределах которой поглощается основная часть энергии гамма-излучения. Выполненные автором работы расчеты методом

Монте-Карло показали, что характерный размер области поглощения энергии гамма-излучения  $\delta_E$  во льду (область, соответствующая поглощению 90% выделяемой источником энергии) для  $^{60}\text{Co}$  составляет  $\delta_E = 69$  см. Таким образом, радиус  $R_E$  брался равным сумме  $R + \delta_E$ .

С помощью выражения (9) были выполнены расчеты мощности тепловыделения и скорости погружения шарообразного устройства с тепловыделяющим радионуклидом  $^{60}\text{Co}$  в толщах льда. Расчеты проводились для устройств различного размера (радиусом менее 1 м). Было получено, что для погружения в толщах льда с начальной скоростью  $\sim 1$  км/год необходима мощность тепловыделения за счет поглощения гамма-излучения  $^{60}\text{Co}$  во льду не менее  $10^4$  Вт.

Также при участии автора настоящей диссертации были выполнены расчеты по разработанной в ИБРАЭ РАН программе, позволяющей решать задачи, возникающие при самозахоронении тепловыделяющих капсул с РАО в неоднородные геологические среды за счет силы тяжести [25]. Реализованная в программе модель основана на совместном решении нестационарных уравнений Навье-Стокса, уравнения теплопроводности с учетом фазовых превращений и уравнения движения распределенного неоднородного источника тепла за счет силы тяжести. Полученные в результате расчета по данной программе значения скорости погружения источника тепла в грунте и парафине, а также выражения для скорости, приведенные в работах [11,27,28], хорошо согласуются с полученным в данной работе выражением (8) для определения скорости погружения при заданном уровне мощности тепловыделения источника.

Также результаты определения скорости погружения и мощности энергосыделения, полученные в настоящей работе, показывают хорошее согласие с данными эксперимента по погружению электронагревателя [26]. В соответствии с результатами работы [26] для погружения со скоростью 0,35 км/год в соли необходима мощность энергосыделения  $\sim 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В результате работы была разработана теплофизическая схема радиоизотопного устройства для погружения в породы гранит и соль. Для передачи энергии от устройства окружающей породе предложен механизм прямого нагрева пород излучением. Учитывая условие поглощения большей части энергии, выделяемой при радиоактивном распаде нуклидов, в окружающей породе, а не внутри устройства, были сформулированы критерии реализации механизма прямого нагрева пород излучением. В соответствии с данными критериями, а также на основе анализа характеристик известных радионуклидов,

в качестве наиболее подходящего для реализации механизма прямого нагрева пород излучением был выбран гамма-излучающий радионуклид  $^{60}\text{Co}$ .

Разработана теплофизическая модель устройства, используя одномерное квазистационарное приближение и представленные в данной работе результаты численных расчетов распределения энерговыделения в окружающих породах за счет поглощения гамма-излучения. Получены аналитические выражения для определения распределения температур в граните и соли при погружении устройства, а также трансцендентное уравнение для расчета скорости погружения в данных породах. Получены распределения температур при погружении устройства с тепловыделяющим радионуклидом  $^{60}\text{Co}$  в граните и соли и оценки скорости погружения в зависимости от мощности тепловыделения устройства. Проведены численные расчеты, в результате которых определены распределения температур и скорость погружения в граните с учетом зависимости теплофизических свойств от температуры. Выполненные расчеты показали, что для достижения скорости около 1 км/год при погружении в граните и соли необходима мощность энерговыделения  $\sim 2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, а при погружении во льду – не менее  $10^4$  Вт. Такие уровни мощности потенциально позволяют достигать глубин погружения до 10 км и более. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с данными, представленными в работах других работ, и расчетами по программе численного моделирования процесса погружения с учетом нестационарных процессов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IAEA Safety Standards Series No. GSG-1. Classification of Radioactive Waste. General Safety Guide. IAEA, Vienna, 2009.
2. Geologic Disposal of Radioactive Waste in Perspective. Nuclear Energy Agency. Organization for economic co-operation and development, OECD, Paris 2000.
3. S.E. Logan. Deep self-burial of radioactive wastes by rock-melting capsules. Nuclear technology, vol. 21, 1974.
4. A.V. Byalko. AHLW Disposal in Deep Sulfur-Filled Boreholes: Start of R&D, @ Proceedings of Waste Management 96, WM Symposia, Tucson, AZ, (1996).
5. S.E. Logan. Deeper geologic disposal: a new look at self-burial.: Proceedings of Waste Management-99 Conference (1999), 10-51pdf, 10 p., (1999).
6. M. Ojovan, F Gibb. Feasibility of very deep self-disposal for sealed radioactive sources. WM'05 Conference, February 27 – March 3, 2005, Tucson, AZ.
7. F. Gibb. High-temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste? Waste Management 19, 1999.
8. M. Ojovan, P. Poluektov, V. Kascheev. Self-Disposal Option for Heat-Generating Waste Proceedings of the ASME 2011 14th International Conference on

- Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. ISEM2011, September 25-29, 2011, Reims, France.
9. М. Ожован. Самопогружающиеся капсулы в геологической разведке и сверхглубокое захоронение радиоактивных отходов. Интернет сайт Российского атомного сообщества, 24.08.2010. <http://www.atomic-energy.ru/articles/2010/08/24/13062>.
  10. W. Chen, J Hao, Z. Chen. A Study of Self-Burial of a Radioactive Waste Container by Deep Rock Melting // Science and Technology of Nuclear Installations Volume (2013), 2013.
  11. S. Emmerman, D. Turcotte. Stokes's problem with melting. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1983, v. 26, no.11. pp. 1625-1630.
  12. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Кондратенко П.С. и др. Способ захоронения радиоактивных отходов и тепловыделяющая капсула для его осуществления / Пат. RU 2510540 С1. Российская Федерация, МПК G21F 9/28 (2006.01); патентообладатель ИБРАЭ РАН. - № 2012134053/07; заявл. 09.08.12; опубл. 27.03.14, Бюл. № 9.
  13. Арутюнян Р.В. Устройство для погружения в расплавляемых геологических породах / Пат. RU 2535199 С1. Российская Федерация, МПК G21F 9/24 (2006.01); патентообладатель ИБРАЭ РАН. - № 2013133421/07; заявл. 18.07.13; опубл. 10.12.14, Бюл. № 34.
  14. Арутюнян Р.В. Устройство для погружения в расплавляемых геологических породах / Пат. RU 2577517 С1. Российская Федерация, МПК G21F 9/24 (2006.01); патентообладатель ИБРАЭ РАН. - № 2015108133/07; заявл. 10.03.15; опубл. 20.03.16, Бюл. № 8.
  15. Арутюнян Р.В., Шведов А.М. Радиоизотопное устройство для погружения в геологические формации земной коры / Пат. RU 2601288 С1. Российская Федерация, МПК G21F 9/24 (2006.01); патентообладатель ИБРАЭ РАН. - № 2015142152/07; заявл. 05.10.15; опубл. 27.10.16, Бюл. № 30.
  16. ICRP, 2008. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP 38 (3).
  17. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Витюков В.В. и др. Теоретический анализ и численного моделирование переноса тепла и миграции топлива в подстилающих грунтах и конструкциях АЭС при аварийных выбросах активной зон: Препринт ИАЭ-4862/3. М., ЦНИИАтоминформ, 1989.
  18. Арутюнян Р.В. Теплофизические модели воздействия умеренных потоков энергии на материалы. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М., 1997. ОИВТ РАН.
  19. Арутюнян Р.В., Р.В. Арутюнян, Л.А. Большов и др. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. – М.: Наука, 2010, 240 с.
  20. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справ./Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М., Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.

21. Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах: Справочник/ Е.И. Баюк, И.С. Томашевская, В.М. Добрынин и др.; Под ред. М.П. Воларовича. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Недра, 1988. – 255 с.: ил.
22. H. Vosteen, R Schellschmidt. Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity thermal diffusivity for different types of rock. *Physics and Chemistry of the Earth* 28 (2003), 499–509.
23. Eppelbaum L, Kutasov I, Pilchin A. *Applied Geothermics*. Springer, 2014. 751 p.
24. Seipold U. Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks — a general law. *Tectonophysics*, v. 291, no. 1, 1998. pp. 161-171.
25. Аветисян А.Р., Арутюнян Р.В., Кондратенко П.С., Матвеев Л.В., Шведов А.М. Математические модели сопряженных процессов теплопереноса и гидродинамики с фазовыми переходами в технологиях энергосбережения и экологической безопасности. *Радиоактивные отходы*, 2019, т .8, № 3. сс. 74-79.
26. Ефанкин В.Г., Кашеев В.А., Полуэктов П.П., Поляков А.С. Лабораторное моделирование самозахоронения радиоактивных отходов. *Атомная энергия*, 1994, т. 76, № 2. сс. 161-163.
27. M.K. Moallemi, R. Viskanta. Melting Around a Migrating Heat Source. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1985, vol. 107, no. 2, pp. 451-458.
28. W. Chen., B. Zhu, Z. Chen., H. Li, F. Sun. New Analysis of contact melting of phase change material around a hot sphere. *Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 44, no. 3. pp. 281-286

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. R. Arutunyan, L. Bolshov, A. Shvedov. A new approach to radioactive waste self-burial using high penetrating radiation. *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 55, № 9, 2018. pp. 971-978.
2. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Шведов А.М. Самозахоронение радиоактивных отходов в геологических формациях за счет прямого нагрева пород излучением. *Атомная энергия*, 2017, т. 123, № 2. сс. 88-91.
3. Арутюнян Р.В., Шведов А.М. Особенности погружения радиоизотопных устройств в толщу льда. *Криосфера Земли*, 2017. т. 21, № 4. сс. 29-33.
4. Аветисян А.Р., Арутюнян Р.В., Кондратенко П.С., Матвеев Л.В., Шведов А.М. Математические модели сопряженных процессов теплопереноса и гидродинамики с фазовыми переходами в технологиях энергосбережения и экологической безопасности. *Радиоактивные отходы*, 2019, т .8, № 3. сс. 74-79.
5. Шведов А.М. Исследование параметров самопогружения РАО в граните за счет прямого нагрева гамма-излучением. *Радиоактивные отходы*, 2026, № 1 (34).