

УДК 621.039.75

Исследование феномена автокаталитической критичности делящихся материалов при захоронении отработавшего ядерного топлива в геологических формациях Европейского Севера России

В.А. Наумов¹, Е.В. Караваева^{1,2,3}

¹ Горный институт КНЦ РАН

² Апатитский филиал МГТУ, кафедра горного дела

³ Горный факультет Кольского филиала ПетрГУ, кафедра горного дела и обогащения

Аннотация. С помощью методов физики ядерных реакторов изучается явление потенциальной критичности в рамках концепции геологического хранилища неперерабатываемого отработавшего ядерного топлива судовых ядерно-энергетических установок. Для математической модели трещиноватой горной породы определены минимальные толщины ядерного топлива (UO_2) на поверхности трещин, соответствующие критическим массам гетерогенных отложений. Описан сценарий автокаталитической критичности, инициируемой изменением климата и развивающийся за счет нагрева среды и удаления воды из пор и трещин горной породы. Сделан вывод о предпочтительности концепции временного хранения неперерабатываемых видов отработавшего ядерного топлива.

Abstract. Using methods of nuclear reactors physics the phenomenon of potential criticality has been studied within the framework of the concept of geologic repository of the non-processible spent nuclear fuel of the ship nuclear power installations. For the fractured rock mathematical model the minimum thickness of fissile material (UO_2) on cracks' surface conforming to critical masses of heterogenous deposits have been determined. The scenario of autocatalytic criticality originated by change of a climate and developed at the expense of heating of medium, and water-transport from pores and cracks of rock has been described. The conclusion about preferability of the concept of temporary storage of non-processible spent nuclear fuel has been made.

Ключевые слова: геологическое хранилище, граниты Кольского полуострова, плагиограниты, отработавшее ядерное топливо, делящиеся материалы, критическая масса, реактивность, надкритичность, изменение климата, поровая вода, нагрев горной породы
Key words: geologic repository, granite of the Kola Peninsula, plagiogranite, spent nuclear fuel, fissile materials, critical masses, reactivity, supercriticality, climate change, pore water, rock heating

1. Введение

Явление автокаталитической критичности рассматривается как часть проблематики природных ядерных реакторов, которые могут действовать в геологических формациях.

Сравнительно недавно, в середине 90-х годов прошлого столетия, исследователи из Лос-Аламосской национальной лаборатории и Калифорнийского университета (США) разработали и проанализировали сценарии больших потенциальных выделений энергии из делящихся материалов, захороненных в подземных могильниках (*Bowman, Vennery, 1996; Kastenbergh, 1990*). Под автокаталитической критичностью (АК) авторы (*Bowman, Vennery, 1996; Kastenbergh, 1990*) понимают надкритическое состояние реактора, сопровождающееся значительным выделением энергии и выходом (вентиляцией) радиоактивности в атмосферу. Надкритическое состояние оказывается в принципе возможным, если в ходе геохимических и гидрогеологических процессов делящиеся материалы выходят из упаковок и переформируются в критическую конфигурацию. Переход из критического в надкритическое состояние может осуществляться при наличии положительных обратных связей по реактивности в рассматриваемой системе из делящихся материалов и горной породы. Примером такого механизма может быть изменение содержания воды в поровом пространстве геологической среды.

Исследователи из Лос-Аламоса и Беркли изучали АК захоронений ядерных материалов, содержащихся в отработавшем ядерном топливе (ОЯТ) (^{235}U , ^{239}Pu) коммерческих АЭС США, а также в остеклованных высокоактивных отходах (ВАО), как продуктах переработки ядерного оружия. Рассмотрение автокаталитической критичности американскими специалистами проведено, в основном, применительно к геологическим, геохимическим и гидрологическим условиям, характерным для могильника Юкка-Маунтин. Основными результатами и выводами были следующие:

- выявлены и оценены большое число конфигураций из ядерных материалов и горной породы (туфа), которые могут быть критическими и обладают положительной обратной связью;
- оцененные сверхкритические состояния, характерные для систем из урана или плутония и водонасыщенных и высокопористых горных пород;
- дается рекомендация выполнять анализы потенциальной АК для проектов будущих геологических могильников делящихся материалов.

Анализ явления АК представляет интерес в рамках задачи по изучению ядерной безопасности при долговременном хранении и захоронении ОЯТ в геологических формациях региона Европейского Севера России. В центре внимания настоящей работы – ОЯТ судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ), которое длительное время (десятки лет и более) хранится в регионе. Всего на береговых и плавучих базах военного и гражданского атомных флотов хранится 40 тонн ОЯТ (данные 1995 г.) (Государственный доклад..., 1995), в том числе ~10 тонн неперерабатываемого ОЯТ с содержанием более 2 тонн ^{235}U (Мельников и др., 2003). Обогащение урана в ОЯТ изотопом ^{235}U варьируется в широких пределах от ~15 до 90 % (Мельников и др., 2003). В концепции обращения с ОЯТ в регионе не исключаются схемы длительного хранения ОЯТ на Кольском полуострове (Государственный доклад..., 1995). К тому же и хранение ОЯТ в течение ограниченного времени (50-100) лет может привести к необходимости рассмотрения его геологического захоронения в случае возможности возникновения ядерных инцидентов, как, например, в случае террористического акта.

Хранение ОЯТ в горных массивах Кольского полуострова имеет свои отличительные особенности: граниты, как вмещающие породы, имеют отличающиеся от туфов химический состав и плотность. Поэтому результаты исследований АК американскими специалистами затруднительно экстраполировать на наш случай без дополнительных анализов.

В данной работе поставлена цель: изучить нейтронно-физические характеристики гранитов и оценить величины критических масс в системе гранит – вода – отработавшее ядерное топливо.

2. Нейтронно-физические свойства гранитов

Предполагается, что на стадии долговременного хранения ОЯТ в результате коррозии материалов будет происходить разрушение упаковок и вынос делящихся материалов во внешнюю среду. При определенных геохимических условиях в геологической среде может происходить переотложение и накопление делящихся элементов в порах и на стенках трещин горной породы. Область, в которой аккумулируются делящиеся изотопы, будем рассматривать как активную зону природного реактора, а внешнюю область – как его отражатель.

Критическое состояние в горной породе, в которую поступают делящиеся изотопы ^{235}U и ^{239}Pu при делокализации материалов упаковки, зависит от ее нейтронно-физических характеристик. В простой модели, опирающейся на диффузионно-возрастное приближение к строгому уравнению переноса нейтронов (уравнение Больцмана), эффективный коэффициент размножения нейтронов среды конечных размеров k_{ef} выражается уравнением критичности*:

$$k_{ef} = k_{\infty} \exp(-\alpha_g^2 \cdot \tau) / (1 + \alpha_g^2 \cdot L^2),$$

где k_{∞} – коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде; τ – возраст нейтронов; L^2 – квадрат длины диффузии – параметр, характеризующий утечку тепловых нейтронов; α_g^2 – геометрический параметр, который в критическом состоянии равен материальному параметру среды α^2 .

Для иллюстрации напомним, что в случае простейшей сферической модели

$$\alpha_g^2 = \pi^2 / R^2,$$

где R – эффективный радиус сферы.

Таким образом, для анализа и сопоставления различных критических систем необходимо получить значения параметров τ и L^2 – для гранита и туфа.

Для расчета параметров замедления и диффузии нейтронов используется математическая программа РИТМ, в которой уравнение переноса нейтронов в многозонной гетерогенной среде решается с помощью метода вероятностей прохождения нейтронов в многогрупповом приближении (Наумов и др., 1996).

Программа РИТМ была применена и в частном случае бесконечно протяженных природных сред из гранита и туфа. Исходными данными для расчета τ и L^2 является минеральный и химический состав типичных пород Мурманского геоблока (Батиева, 1978). Результаты расчета возраста нейтронов, квадрата длины диффузии тепловых нейтронов, а также вероятности избежать поглощения ϕ при замедлении до границы с тепловой областью (0,5 эВ) для этих же типов пород представлены в табл. 1 и 2. Для расчета τ , L^2

* Используется только в целях иллюстрации результатов

Таблица 1. Параметры замедления и диффузии нейтронов для различных горных пород в сухом состоянии, программа РИТМ

Параметры	Порода			
	Туф	Тоналит	Плагиогранит	Гранодиорит
Плотность г/см ³	2,2	2,67	2,67	2,67
τ , см ²	1007	693	683	697
ϕ	0,7834	0,7987	0,8205	0,7971
L^2 , см ²	325	234	237	227

Таблица 2. Параметры замедления и диффузии нейтронов для влажных горных пород, программа РИТМ

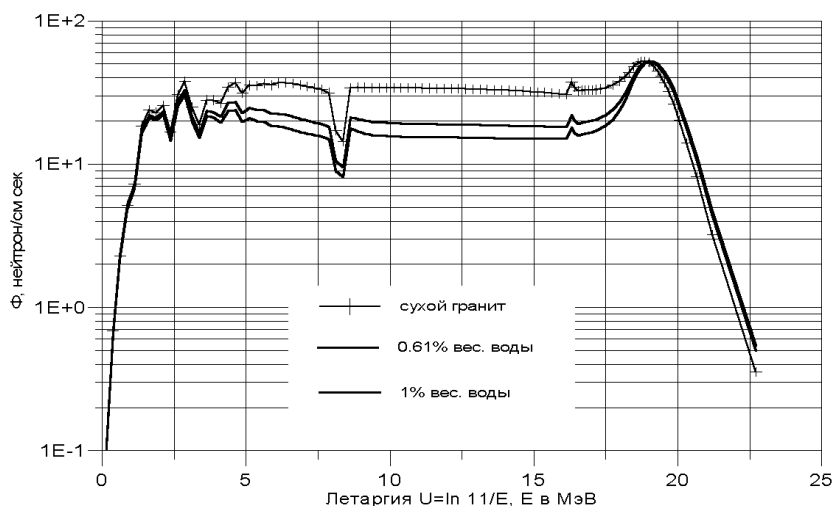
Параметры	Порода		
	Тоналит	Плагиогранит	Гранодиорит
Влагосодержание, масс. %	0,61	0,82	0,97
τ , см ²	392	434	367
ϕ	0,8842	0,8755	0,8740
L^2 , см ²	150	163	125

и ϕ с помощью программы РИТМ было выполнено решение задачи об энергетическом распределении плотности потока нейтронов $\Phi(E)$ в гомогенных средах, состоящих из гранита и урана.

Из результатов расчетов следует, что τ и L^2 слабо зависят от химического состава гранитов, распространенных на Кольском полуострове: максимальное различие для тоналитов, плагиогранитов и гранодиоритов 2-4 %. Возраст и квадрат длины диффузии для туфа выше, чем для гранитов, примерно в 1,4 раза, что объясняется различием их плотностей. Этот эффект обратно пропорционален плотности, и он будет предопределять большую утечку и большую критическую массу для систем на основе туфа, нежели в случае уран-гранитовых реакторов. Данные табл. 2 демонстрируют очень сильное влияние на нейтронно-физические параметры влагосодержания W горных пород. Переход от сухого состояния породы к влагонасыщенному вызывает снижение поглощения замедляющихся нейтронов породообразующими минералами почти в 2 раза и снижение в 1,5-2 раза величин τ и L^2 . Эти эффекты объясняются существенно более высокой замедляющей способностью водонасыщенных пород по сравнению с сухими даже при малых содержаниях воды в граните.

Следует обратить внимание на то, что возраст нейтронов деления влажных гранитов близок к возрасту нейтронов для графита, и физика размножающих систем на основе уран-гранита, вероятно, наиболее близка к физике уран-графитовых реакторов. Типичный спектр замедляющихся и тепловых нейтронов в среде из плагиогранита и урана представлен на рис. 1. Плагиогранит можно считать представительной разновидностью гранита, и исследования АК выполнены для этого вида гранита.

Рис. 1. Спектральное распределение плотности потока нейтронов в бесконечной гомогенной среде из плагиогранита плотностью 2,67 г/см³ при объемных источниках нейтронов деления интенсивностью 1 нейтр/(см³ · с)



3. Критические массы однородных сред из плагиогранита и обогащенного урана

Миграция урана и плутония во вмещающей геологической среде сопровождается осаждением делящихся изотопов на стенках трещин и в порах горной породы в процессах сорбции на составляющих ее минералах, что со временем приводит к накоплению ²³⁵U и ²³⁹Pu.

В наиболее простом случае горная порода представляется модельной однородной смесью плагиогранита и двуокиси урана. Предполагается, что поровое пространство породы заполнено водой.

Для определенности пористость n задана величиной 2,0 % объемных. Обработавшее топливо моделируется UO_2 различного обогащения от 20 до 81,6 % массовых.

Задача заключается в определении концентрации ^{235}U , которая обеспечивает некоторое превышение k_{∞} над единицей, достаточное для компенсации утечки из конечной системы "гранит-уран" и критичность системы.

В табл. 3 представлены результаты расчета нейтронно-физических характеристик и параметров размножения нейтронов в среде из урана и влагонасыщенного плагиогранита при $n \cong 2,0$ % объемных. Анализ данных табл. 3 позволяет отметить наиболее существенные особенности изучаемых систем:

1. Замедление рождающихся при делении ядер ^{235}U нейтронов, в основном, на ядрах кислорода сопровождается поглощением нейтронов кремнием, железом, натрием, алюминием, калием и ^{238}U и сильно снижает потенциал размножения нейтронов. Вероятность поглощения нейтронов $(1-\phi)$ в изученных системах изменяется в пределах от 0,3 до 0,65 в зависимости от обогащения.
2. Критические размеры гипотетических природных реакторов в значительной степени зависят от площади миграции M^2 , которая изменяется в зависимости от концентрации ^{235}U от 360 до 480 cm^2 .
3. Критические концентрации ^{235}U (вторая колонка табл. 3) находятся на весьма высоком уровне значений. Так, например, при обогащении 81,6 %, характерном для ОЯТ уран-бериллиевого типа, ядерная концентрация ^{235}U равна $\sim 0,2 \cdot 10^{20} / cm^3$, что соответствует содержанию двуокиси урана в горной породе $1,0 \cdot 10^{-3}$ г/т. При обогащении 20 % для обеспечения критичности содержание UO_2 в горной породе должно быть $\sim 1,0 \cdot 10^{-2}$ г/т. Приведенные значения характеризуют гомогенную среду "уран-гранит" как богатую или очень богатую ураноносную породу и могут расцениваться как свидетельство низкой вероятности образования в низкопористых гранитах критических скоплений делящихся элементов из состава ОЯТ судовых ЯЭУ.
4. Параметр a^2 (последняя колонка табл. 3) является материальным параметром среды, который приводит систему с заданной концентрацией ^{235}U к критическому состоянию. Параметр a^2 определен в итерационном процессе решения многогрупповых уравнений переноса нейтронов, с неявно заданной утечкой в виде $a^2 D$, в котором достигается условие $k_{ef} = 1$, где D – коэффициент диффузии, см. Таким образом, он является и геометрическим параметром критического реактора конечных размеров.
5. Данные по величинам критических масс в зависимости от обогащения топлива показывают начальные условия, при которых в горной породе типа плагиогранита может возникнуть спонтанная цепная реакция.

Таблица 3. Нейтронно-физические характеристики гомогенных сред из высокообогащенного урана и плагиогранита, программа РИТМ

Обогащение урана, %	Концентрация атомов ^{235}U , $10^{20} / cm^3$	Сечение поглощения, Σ_a, cm^{-1}	k_{∞}	M^2, cm^2	ϕ	$M_{кр}, кг$	a^2, m^{-2}
81,6	0,198	0,01300	1,070	479,0	0,7283	441.5	1,387
	0,213	0,01337	1,100	475,1	0,7188	273.9	1,952
	0,231	0,01382	1,130	470,6	0,7076	180.2	2,565
49,7	0,232	0,01390	1,070	460,4	0,6638	502.0	1,423
	0,254	0,01445	1,100	454,9	0,6485	298.5	2,024
	0,281	0,01511	1,130	448,7	0,6306	206.9	2,651
29,7	0,296	0,01556	1,070	431,2	0,5755	586.6	1,488
	0,337	0,01655	1,100	425,8	0,5495	359.6	2,141
	0,392	0,01784	1,130	415,9	0,5186	257.1	2,831
19,8	0,411	0,01838	1,070	402,6	0,4736	689.6	1,597
	0,518	0,02080	1,100	386,7	0,4226	471.9	2,346
	0,725	0,02524	1,300	363,2	0,3460	375.0	3,237

4. Критические массы для случая трещиноватой горной породы

Более реалистичская модель размножающей нейтроны системы "уран-гранит" основана на представлениях о горной породе как о трещиноватой среде.

Рассматривается система плоскопараллельных равноудаленных одна от другой трещин. Поток воды, проходящий по трещине, заполняет поровое пространство породы. Таким образом, геометрия элементарной структуры системы "уран – горная порода" представляется плоской одномерной трехзонной решеткой с зонами воды, топливного слоя и влажной горной породы.

Для такой системы выполнены многопараметрические расчетные нейтронно-физические исследования с вариацией толщины топливного слоя (δ), модуля трещиноватости (m), влажосодержания (W) в матрице горной породы, пористости породы (n), обогащения урана изотопом ^{235}U (x). Главной целью ставилось определение толщины топливного слоя, критической массы гетерогенных отложений, а

также характеристики механизма положительной обратной связи реактивности с температурой среды и влажностью горной породы W , который может инициировать спонтанную цепную реакцию на мгновенных нейтронах.

Для решения этой задачи были применены две реакторные математические программы РИТМ и КРАТЕР (Мельников и др., 2003). Табл. 4 демонстрирует основные нейтронно-физические параметры критических природных реакторов на основе системы "UO₂ – H₂O – плагиогранит" при различной пористости влагонасыщенной горной породы и фиксированном шаге размещения трещин 10 см для двух значений обогащения урана из состава ОЯТ: 30 и 50 %.

Установленные зависимости геометрического параметра α_g^2 от пористости горной породы показывают характерный для реакторных решеток оптимум, в котором наблюдается и максимальное значение материального параметра, в нашем случае – при $n = 7$ % объемных.

Данные табл. 4 иллюстрируют возможность достижения минимальных критических размеров реактора при фиксированных значениях пористости и обогащения или минимальной толщины слоя отложений, который соответствует критическому состоянию природного реактора (см. рис. 2). Как следует из рис. 2, диапазон толщины топливного слоя изменяется от 180 до 50 мкм для рассмотренного интервала обогащения топлива изотопом ²³⁵U от 30 до 90 % при $m = 10$.

Критические размеры и массы для диапазона толщины топливного слоя δ от 50 до 200 мкм были определены по упрощенной методологии, предполагающей сферическую модель реактора. Данные по критическим массам и размерам для нескольких типичных составов системы "уран-плагиогранит", охватывающих широкий диапазон обогащения топлива и толщин топливного слоя, приведены в табл. 5.

Таблица 4. Нейтронно-физические характеристики критических систем на основе UO₂ и плагиогранита, программа РИТМ

	x = 30 %, $\delta = 180$ мкм				x = 50 %, $\delta = 100$ мкм			
	0,5	4	7	15	0,5	4	7	15
$W, \%$	0,5	4	7	15	0,5	4	7	15
k_∞	1,0368	1,0976	1,0899	1,0332	1,0713	1,0933	1,0799	1,0154
ϕ	0,5579	0,7656	0,8265	0,8927	0,6358	0,7975	0,8478	0,9040
$k_{\infty T}$	0,6949	0,9219	0,9668	0,9632	0,7766	0,9392	0,9690	0,9520
$L^2, \text{см}^2$	108,9	70,51	54,91	33,67	104,2	69,49	54,55	33,75
$\tau, \text{см}^2$	546,8	305,14	229,5	140,2	502,3	292,1	221,1	137,2
$\alpha_g^2, 1/\text{м}^2$	0,5833	2,563	3,252	2,231	1,197	2,634	3,005	1,247

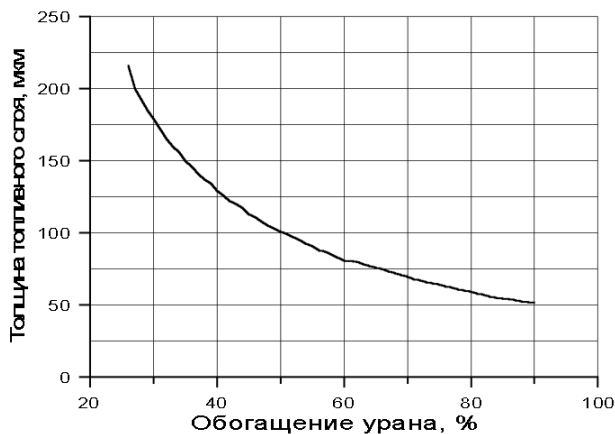


Рис. 2. Минимальная толщина топливного слоя отложений в критическом состоянии при модуле трещиноватости горной породы, равным 10

Таблица 5. Характеристики гетерогенных природных реакторов на основе водонасыщенного гранита и двуокси урана при температуре 280 К; программы РИТМ и КРАТЕР, сферическая геометрия

Пористость горной породы, %	Модуль трещиноватости	Толщина отражателя из гранита, см	Толщина слоя UO ₂ , мкм	Обогащение урана изотопом ²³⁵ U, %	Критический радиус активной зоны, см	Критическая масса ²³⁵ U, кг
10	10	100	180	30	160	196
10	10	100	200	30	124	102
15	10	100	180	30	183	293
7	10	100	100	50	166	169
7	10	100	55	85	178	193
7	12	100	55	85	116	64,5
10	10	100	55	85	200	330

Как следует из табл. 5, критический размер изменяется от минимального $R_{кр} = 116$ см при обогащении 85 %, толщине топливного слоя 55 мкм, $m = 12$ до максимального значения $R_{кр} = 200$ см при минимальном значении m , равным 10. Соответствующие этим размерам критические массы равны ~ 65 и 330 кг ^{235}U . Выполненные расчетные исследования выявили сильную зависимость критической массы не только от трещиноватости, но и от толщины топливного слоя, влагосодержания и пористости влажной породы. Так при $x = 30$ % и $n = 10$ % изменение δ от 180 до 200 мкм снижает критическую массу от 193 до 102 кг (см. первые строки табл. 5). Особо следует отметить влияние W . Например, при снижении пористости, заполненной водой, с 15 до 10 % материальный параметр увеличивается примерно в 2 раза, а критический размер более чем в 1,5 раза (см. последнюю строку табл. 5). Это также видно на примере сопоставления критических масс для системы с $x = 85$ %. При $n = 10$ % критическая масса равна 330 кг, при $n = 7$ % – 193 кг. В системах с большой пористостью вода является в большей степени поглотителем, нежели замедлителем нейтронов.

Установленные значения критической массы природных реакторов (от 65 до 330 кг) значительно меньше, чем полное содержание делящихся изотопов в перерабатываемом и дефектном ОЯТ (~ 2500 кг), и это соотношение подтверждает актуальность изучения явления АК. Однако показанная принципиальная возможность достижения критического состояния в системе "гранит – обогащенный уран" является необходимым, но не достаточным условием АК. Как отмечалось ранее, дополнительно необходимы механизмы положительной обратной связи реактивности с физическими параметрами среды. Наиболее естественным таким механизмом может быть изменение влагосодержания или плотности воды в трещинах и порах горной породы в результате изменения температуры подземной воды и геологической среды в целом. Причиной может быть потепление климата.

5. Описание сценария автокаталитической критичности

Для объяснения возможного сценария АК был рассмотрен случай гетерогенных отложений двуокиси урана на поверхности трещин в водонасыщенной горной породе с $n = 15$ %. При апертуре трещин 760 мкм, толщине слоя UO_2 ($x = 30$ %) 180 мкм и температуре 280 К сферический реактор радиусом 183 см находится в критическом состоянии (см. табл. 5). Для этого реактора было определено влияние удаления воды из порового пространства и трещин породы на эффективный коэффициент размножения нейтронов (см. рис. 3).

Дополнительно были определены параметры нейтронной кинетики: эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{ef} = 0,00658$ и среднее время жизни мгновенных нейтронов $l_o = 1,9 \cdot 10^{-4}$ с, необходимые для пояснения динамики реактора. Динамику k_{ef} , представленную на рис. 3, можно рассматривать как характеристику природного процесса осушения критической системы, следующего за периодом влагонасыщенного состояния геологической среды, в условиях которого произошло отложение топлива. Рис. 3 показывает рост k_{ef} от 1 до 1,057 по мере снижения W от 100 до 45 %. Освобождающаяся в этом процессе реактивность $\rho = (k_{ef} - 1) / k_{ef} = 0,054$, что в 8 раз выше β_{ef} . В этом интервале влагосодержания система находится в надкритическом состоянии.

Развивающаяся в процессе деления ядер ^{235}U мощность P и плотность потока нейтронов (ППН) Φ в надкритическом состоянии изменяются по экспоненциальному закону

$$P = P_o \exp(t/T), \quad \Phi = \Phi_o \exp(t/T) \quad \text{и} \quad 1/T = (\rho - \beta_{ef}) / l_o,$$

где t – время, T – период, P_o и Φ_o – начальные мощность и ППН, соответственно; ρ – реактивность, β_{ef} – эффективная доля запаздывающих нейтронов, l_o – среднее время жизни запаздывающих нейтронов.

В горной породе всегда имеются источники нейтронов за счет спонтанного деления естественно-радиоактивных изотопов (^{238}U , ^{234}U). В нашем случае при рассмотрении рассеяния в природной среде делящихся материалов следует учитывать наличие α -активных ядер, таких как ^{240}Pu и ^{242}Pu , которые вызывают появление нейтронов при спонтанных делениях, а также в (α, n) реакциях на ядрах атомов, входящих в состав гранита ^{23}Na , ^{25}Mg , ^{27}Al и др. По нашим оценкам, мощность источников нейтронов составляет примерно 1 нейтр/(см³·с), что обуславливает ППН $\sim 5 \cdot 10^2$ нейтр/(см²·с), см. рис. 1, и это значение дает минимальную величину Φ_o .

В начальный период осушения горной породы k_{ef} увеличивается слабо, а период нарастания потока значителен. Например, при $k_{ef} = 1,001$ период, зависящий не только от величины реактивности, но и времени жизни предшественников запаздывающих нейтронов, составляет ~ 100 с (Вейнберг, 1961). При таком темпе нарастания ППН за время порядка часа удельная мощность достигнет уровня энергетического реактора ($\Phi \sim 10^{15}$ нейтр/см²·с), и начнется нагревание топливного слоя и окружающей его горной породы. На этой стадии реактивность будет расти за счет положительного температурного эффекта, см. табл. 6.

Рис. 3. Динамика k_{ef} гетерогенной системы UO_2 ($x = 30\%$) + плагиогранит ($n = 15\%$ объемных) в зависимости от относительного содержания воды в породе

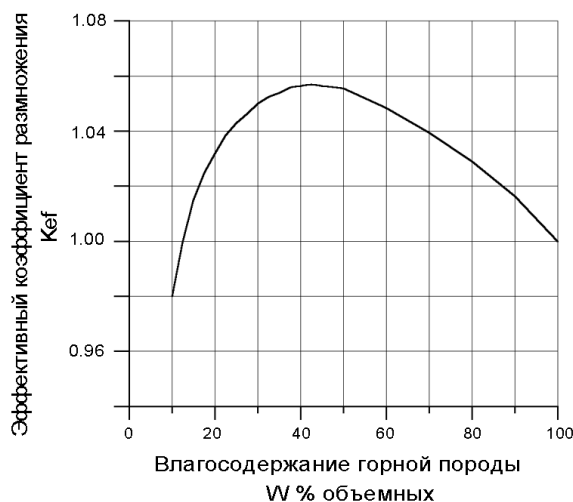


Таблица 6. Температурная зависимость k_{ef} для сферического реактора с радиусом активной зоны 183 см, $\delta = 180$ мкм, $x = 30\%$, $n = 15\%$ и $W = 100\%$

Температура топлива, К	Температура горной породы, К				
	280	373	573	1000	2000
280	1,00	-	-	-	-
373	-	1,0057	-	-	-
573	-	-	1,0128	-	-
1000	-	-	-	1,0146	-
2000	-	-	-	-	1,0050

При нагреве среды до 373 К освобождается реактивность 0,0057, а изменение плотности воды в этом интервале температуры увеличивает реактивность до 0,0093*, т.е. выше величины β_{ef} , и система переходит в состояние спонтанной цепной реакции (СЦР) на мгновенных нейтронах с коротким периодом $l_0 / (\rho - \beta_{ef}) < 0,07$ с. В дальнейшем освобождается реактивность от удаления воды из порового пространства породы $\sim 0,05$ ($7,6 \beta_{ef}$), см. рис. 3, и температурного эффекта реактивности 0,009 ($1,4 \beta_{ef}$), рост которой продолжается в интервале температуры среды от 373 до 1000 К, см. табл. 6.

Через время порядка менее 0,1 с цепную реакцию прекращают процессы разрушения и расширения системы, отрицательный температурный эффект при достижении температуры среды 1000 К и удалении воды из горной породы в интервале $W < 45\%$.

При освобождении на стадии энергетического режима всей положительной реактивности 0,059 ($9 \beta_{ef}$) может выделиться значительная энергия. Нижний уровень ее величины может быть оценен по величине энергии абляции ε горной породы, заключенной в объеме активной зоны. Принимая $\varepsilon = 2$ МДж/кг (Schneider, Diederichs, 1981) и радиус сферической активной зоны $R = 1,83$ м, получаем для величины энергии значение 140 ГДж.

В заключение отметим, что в представленной работе авторами не рассматривалась задача образования отложений на поверхности трещин в слаботрециноватых гранитах по геохимическим условиям среды.

6. Выводы

Результаты исследования феномена автокаталитической критичности делящихся материалов в системе подземного хранилища ОЯТ применительно к гранитам, как вмещающей породе, позволили сформулировать следующие выводы:

- на основе применения теоретических методов нейтронной физики впервые установлены параметры замедления нейтронов деления и параметры диффузии тепловых нейтронов для типичных пород Кольского полуострова;
- с помощью методов реакторной физики определены критические параметры гипотетических природных реакторов для физического аналога низкопористых и слаботрециноватых горных пород;
- на основе анализа температурных эффектов реактивности, эффектов от изменения влагосодержания горной породы количественно описан потенциальный механизм автокаталитической критичности;

* Программа РИТМ прогнозирует рост реактивности с производной $dp/dt = 0,0001 \text{ К}^{-1}$.

- результаты изучения явления потенциальной автокаталитической критичности поддерживают концепцию долговременного хранения ОЯТ судовых ЯЭУ с последующей его переработкой, но не концепцию могильника.

Авторы выражают благодарность академику Н.Н. Мельникову, профессору, д.т.н. В.П. Конухину за проявленный интерес и поддержку работы, а также к.т.н. С.А. Гусаку за полезное обсуждение результатов исследования.

Литература

- Bowman C.D., Vennery F.** Underground supercriticality from plutonium and other fissile material. *Science and global security*, v.5, p.279, 1996.
- Kastenberг W.E.** Consideration of autocatalytic criticality of fissile materials in geologic repositories. *Nuclear Technology*, v.115, p.298-310, 1990.
- Shneider U., Diederich U.** Physikalische Eigensharten von beton von 20C bis zum Schmolzen. *Betonverk+Fertigtei.*, Heft 3/81, 4/81, 1981.
- Батиева И.Д.** Гранитоидные формации докембрия северо-восточной части Балтийского щита. *Л., Наука*, 264 с., 1978.
- Вейнберг А.** Физическая теория ядерных реакторов. *Под ред. Я.В. Шевелева. М., Изд. иностранной литературы*, 548 с., 1961.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Российской Федерации в 1994 г. *Проблемы охраны окружающей среды и природных ресурсов*, № 10, с.80, 1995.
- Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А., Амосов П.В., Наумов А.В., Катков Ю.Р.** Отработавшее ядерное топливо судовых энергетических установок на Европейском Севере России. Часть I. *Апатиты, КНЦ РАН*, 166 с., 2003.
- Наумов В.А., Рубин И.Е., Днепровская Н.М.** Описание ослабления нейтронов в биологической защите методом вероятностей прохождения. Препринт ИПЭ-17. *Минск, Ин-т проблем энергетики АН Беларуси*, 28 с., 1996.