

УДК 001; 622.24: 622.276.6: 622.272

Я.Б.Петривский, д.т.н., профессор

ЭФФЕКТ СТАБИЛИЗАЦИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ГРАНИЦЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЙ ВМЕЩАЮЩИХ МОГИЛЬНИК РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Ровенский государственный гуманитарный университет, e-mail: yaroslav.borisysh@rambler.ru

На основании изучения проблемы обеспечения безопасности захоронения радиоактивных отходов в глубоких недрах геологических формаций установлен эффект стабилизации физико-механических параметров горных пород на границе геологических формаций вмещающих высокоактивный источник излучения.

Введение. Конструктивный подход к решению проблем, связанных с обращением радиоактивных отходов (РАО) приобретает важнейшее значение для современной цивилизации. Высокая радиационная опасность отходов, сохраняемая ими на протяжении длительных промежутков времени, требования к высокому уровню надежности и безопасности утилизации диктуют необходимость создания новых технологий обращения с отходами. Особенно острой остается задача захоронения радиоактивных и опасных химических высокоактивных отходов (ВАО), как твердых, так и жидких, состоящих в основном из отработанного ядерного топлива. Предлагаются разные альтернативные варианты, но единственно всеобщее признанной возможностью избавления человечества от этого вида отходов на сегодняшний день представляется глубокое захоронение таких отходов в могильниках на глубине не менее 300-500 м в глубоких геологических формациях с соблюдением принципа многобарьерной защиты и обязательным переводом жидких отходов в отвержденное состояние. Наиболее подходящими по совокупности своих свойств геологическими формациями являются массивы каменных солей, глинисто - аргиллитовые формации, кристаллические (скальные) массивы (в частности, гранито - гнейсы), а также туфы [1].

Состояние проблемы. В качестве индикатора радиационной безопасности хранилища используются дозы и риски потенциального облучения населения. Система изоляции считается безопасной, если будет доказано, что в процессе ее эволюции в течение всего срока изоляции дозы и риски потенциального облучения населения не превысят установленные законодательством пределы. Очевидно, что для геологических систем изоляции численные значения индикаторов безопасности могут быть лишь оценены с определенной долей уверенности. Оценки индикаторов безопасности выполняются на основании: 1) создания комплекса моделей (структурной, гидрогеологической, миграционной, горно-механической и др.) геологической среды; 2) проведения натуральных и имитационных экспериментов по изучению переноса тепла, влаги и радионуклидов в системе инженерных барьеров; 3) изучения природных аналогов системы изоляции; 4) разработки модели биоценозов в месте расположения системы изоляции; 5) палеоклиматических и палеогидрогеологических реконструкций. В процессе обоснования безопасности необходимо установить, изучить и оценить факторы, которые определяют мобилизацию и перенос радионуклидов в биосферу. К таким факторам могут быть отнесены: - свойства компонентов системы изоляции как инженерных, так и естественных; - процессы взаимодействия инженерных и естественных барьеров, а также процессы переноса и удержания радионуклидов в геологической среде; - события и явления, происходящие вне системы изоляции и влияющие как на целостность инженерных барьеров, так и скорость миграции радионуклидов в геологической среде. Главным нормативным критерием, регламентирующим утечку радиации из могильника в породы древних кристаллических формаций, является предел суммарной утечки радиоактивных изотопов в течение 10 тыс. лет после захоронения. Указанный норматив регламентируется тем, что в течение первых сотен лет после захоронения РАО радиационное тепловое излучение будет происходить главным образом за счет распада короткоживущих изотопов и продуктов деления.

С целью снижения затрат на строительство могильника наиболее целесообразным и экономически оправданным вариантом является совмещение строительства инженерных систем могильника с проходкой шахтных стволов, предназначенных для разработки глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых, например алмазоносных.

Рассмотрим на конкретном примере технических и технологических решений по комплексному промышленному освоению недр с созданием инженерных систем многоцелевого назначения в метаморфических породах, возможность создания могильника для захоронения радиоактивных отходов в породах древних кристаллических формаций. Технологическая схема разработки глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых включает вскрытие вертикальными скважинами, пройденными с земной поверхности, и подземными горными выработками, подготовку и выемку полезного ископаемого блоками с формированием камер и межкамерных целиков и выдачу разрушенного полезного ископаемого на поверхность для обогащения через подземные горные выработки [2,3].

Постановка задачи. Задача состоит в том, чтобы на стадии проектирования могильника, учитывая указанные критерии безопасности, оценить значение руководящего количественного параметра X , рис.1, характеризующего: 1) влияние радиационно-термического воздействия РАО на инженерные и естественные барьеры могильника, процессы переноса и удержания радионуклидов в геологической среде вмещающей могильник РАО; 2) проектную отметку расположения верхней границы могильника, необходимое углубление шахтных стволов в геологические формации, пространственное расположение подземных инженерных систем с целью реализации во времени необходимого и достаточного условия – постоянства физико-механических параметров полезного ископаемого, закладочного материала выработанного пространства выработки глубокозалегающего месторождения полезных ископаемых, вмещающих пород, залегающих в плоскости нижнего горизонта выпуска отбитого полезного ископаемого.

В широком понимании этот тезис можно сформулировать следующим образом – физико-механические параметры ископаемого и закладочного материалов разрабатываемой геологической формации на нижнем горизонте выпуска отбитого полезного ископаемого и физико-механические параметры горных пород, вмещающей горную выработку, расположенных в плоскости нижнего горизонта выпуска, должны сохранять постоянное значение, установленное до момента захоронения РАО, регламентированное естественным радиоактивным распадом элементов рассеянных в земной коре (уран, торий, калий, продукты их распада), и не изменяться в перспективе, по меньшей мере, в течение 50 лет с момента захоронения последней партии РАО. Указанный временной отрезок необходим для извлечения РАО из могильника в случае возникновения нештатных ситуаций, например тектонических нарушений, приводящих к деформации массива горных пород и увеличению скорости фильтрации подземных вод в геологических формациях, вмещающих могильники. 1

Результаты исследований. Глубина заложения могильника характеризуется руководящим количественным параметром X – расстоянием по вертикали между горизонтом выпуска 1 и верхней границей могильника 2, рис.1. Отнесение параметра X к категории руководящих параметров вызвано следующими возможными явлениями и их последствиями для массива горных пород.

Во-первых. Параметр X характеризует мощность горных пород, температура которых в окрестности системы скважин 3, заполненных ОЯТ и закладочным материалом, является максимальной. По мере распространения тепла по направлению к горизонту выпуска 1, горные породы поглощают тепловую энергию. В идеальном случае, температура горных пород на горизонте выпуска должна быть постоянной и соответствовать температуре горных пород до момента размещения ОЯТ в системе скважин 3 могильника. На практике такой случай маловероятен.

Во-вторых. Поровая вода горных пород, закладочного материала, материала используемого для создания технических барьеров под действием радиоактивного излучения ОЯТ, постоянно находится в состоянии радиолитического разложения. В процессе радиолитического разложения определенное количество ионов водорода рекомбинирует с электронами в атомарный водород, обладающий достаточной миграционной способностью в пористых средах. Мигрируя в ультра- и микропорах атомарный водород при накоплении способен переходить в молекулярное состояние (молекуляризоваться), выделяя при этом значительное количество энергии – 485 кДж/моль, которая переходит в кинетическую энергию. В областях скопления водорода образуется значительное давление, которое может приводить к хрупкому разрушению материала. Разрушительная способность водорода, гелия в реакторных материалах (металлах, сплавах), ядерном топливе разного состава (диоксида урана), вакансионное расширение, его причины и основные механизмы достаточно известны и изучены [4, 5].

Как правило, массив горных пород преимущественно на границе раздела геологических формаций нарушен трещинами различных уровней. В трещинах находится многокомпонентный заполнитель, физико-механические свойства которого отличается от физико-механических свойств пород, вмещающих могильник. Таким образом, на границах геологических формаций могут возникнуть очаги колебания параметров физико-механического поля, значительно отличающиеся от первоначального значения характеристик физико-механических свойств горных пород, регламентированных естественным радиоактивным распадом. Локальные участки с высокой температурой и высокими внутренними радиолитическими напряжениями вызовут отрицательные явления и непрогнозируемые последствия образования системы трещин во вмещающих геологических формациях, ориентированных по глубине к границам могильника, их расширению с выносом измельченного материала двухфазной смесью в сторону массива горных пород, ослабленного подземными горными выработками. Снижение прочности массива горных пород, вмещающих могильник, может привести через определенный отрезок времени к их обрушению на инженерные системы могильника.

В-третьих. Руководящий количественный параметр X включает мощность пород M , слагающих саркофаг, являющихся естественным защитным барьером радионуклидов. Обрушение пород саркофага приведет к глобальным по масштабам катастрофическим последствиям на окружающую среду.

Для оценки значения руководящего параметра X , осуществлено числовой анализ процессов распространения тепла, радиолитического газообразования и газонакопления в массиве горных пород древних кристаллических формаций, внутренних напряжений в системе инженерных и естественных барьеров могильника при радиоактивном распаде продуктов деления ОЯТ, размещенных в могильнике.

Источник высокой температуры (от 100°C до 400°C) находится на глубине X . При составлении математической модели изучаемого процесса, источник высокой температуры (в данном случае ОЯТ) был принят такой мощности, которая на протяжении отрезка времени в 50 лет будет постоянно поддерживать высокую температуру, равную в среднем 300°C , на верхней и боковых границах могильника. Со временем температура горных пород будет уменьшаться вследствие выгорания ОЯТ. Данный фактор можно учесть при наличии качественного состава ОЯТ и отвержденных высокоактивных отходов, что позволит определить снижение мощности тепловых источников во времени. Установившуюся температуру будем рассматривать как некоторое среднее значение температуры, распределенной равномерно по боковым и верхней границам могильника, которые совпадают с внутренними границами саркофага.

Начальное распределение температуры в рассматриваемых границах характеризуется геотермическим градиентом, который равен в среднем 3°C на каждые 100 метров по глубине земной коры.

Расчет распространения высокой температуры в массиве горных пород, вмещающих могильник РАО, произведен с учетом известных коэффициентов, их неизменности от влияющих факторов, изотропности свойств окружающей среды, а также предварительных оценочных значений геометрических размеров могильника. При расчетах были взяты средние значения коэффициентов для гранитов и базальтов: коэффициент теплоемкости $c = 0,79 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$; плотность горных пород, вмещающих могильник РАО $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$; коэффициент теплопроводности $k = 3,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$. При расчетах область высокой температуры, окружающей

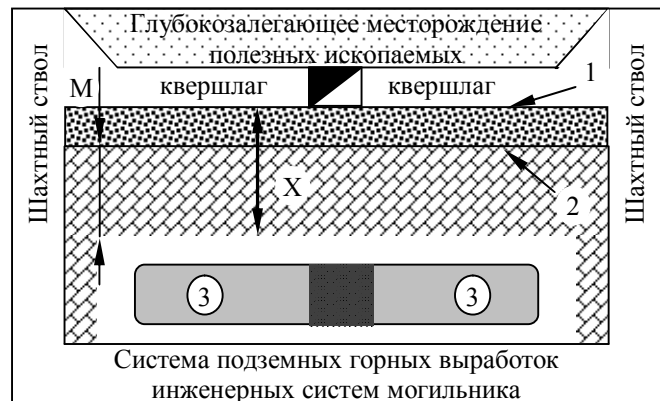


Рис. 1. Схема к расчету физико-механических параметров горных пород вмещающих могильник РАО.

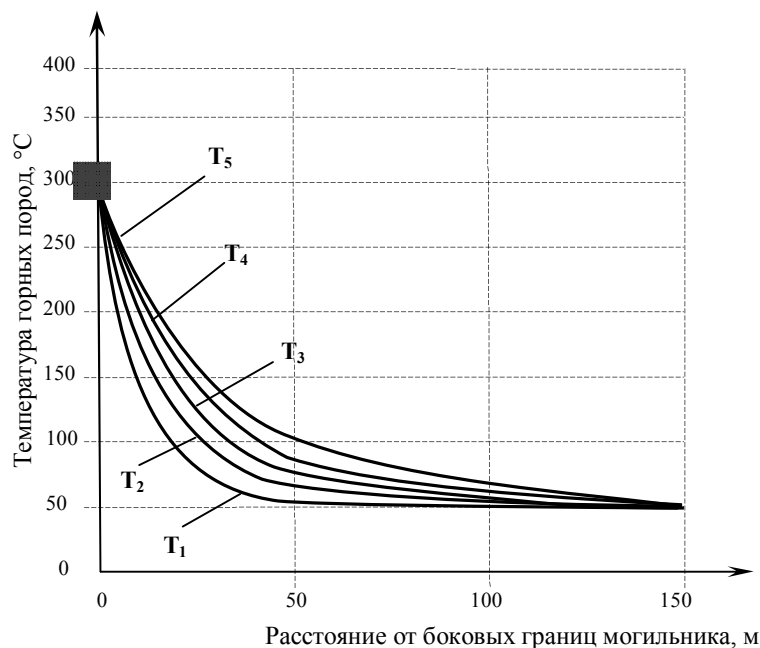


Рис. 2. Изменения значений температур горных пород, расположенных за боковыми границами могильника во временных дискретных интервалах: $T_1 = 10$ лет, $T_2 = 20$ лет, $T_3 = 30$ лет, $T_4 = 40$ лет, $T_5 = 50$ лет.

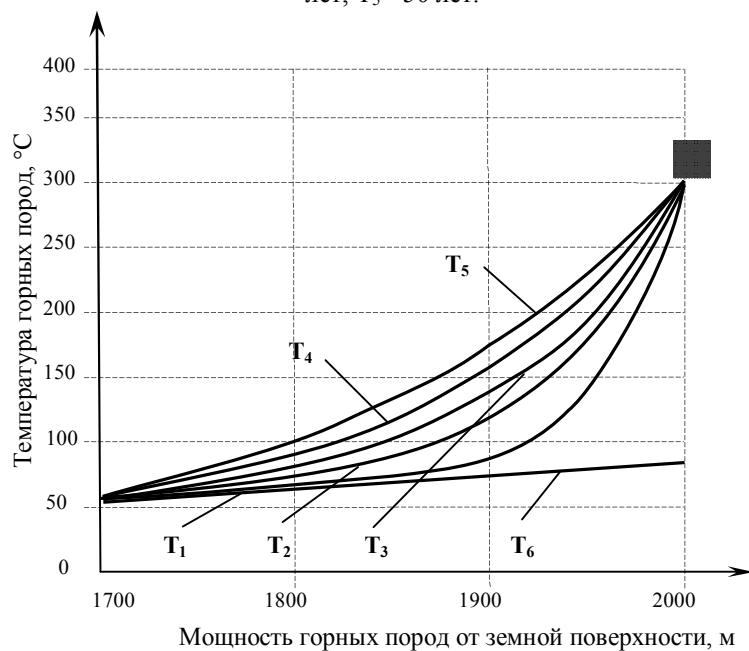


Рис. 3. Изменения значений температур горных пород от глубины заложения и продолжительности воздействия источника высокой температуры на горный массив: $T_1 = 10$ лет, $T_2 = 20$ лет, $T_3 = 30$ лет, $T_4 = 40$ лет, $T_5 = 50$ лет, T_6 – геотермический градиент.

стволов в породы древних кристаллических формаций до проектной отметки расположения инженерных систем могильника РАО.

В случае совмещения разработки глубокозалегающего месторождения полезных ископаемых со строительством и эксплуатацией могильника РАО во вмещающих месторождение горных породах древних кристаллических формаций, необходимым и достаточным условием комплексного освоения недр является постоянство температуры горных пород на горизонте выпуска 1, регламентируемое геотермическим градиентом, до и после

могильник РАО, выбрана в форме прямого цилиндра высотой 1 м и диаметром 600 м, что соответствует действительности. Значение коэффициента

температуропроводности составляет $a^2 = 6,275 \cdot 10^{-3}$ м²/час. Для решения задачи источник высокой температуры считался размещенным в кристаллических породах (гранитах) на глубине 1000 м от горизонта выпуска 1, что соответствует расстоянию от земной поверхности в 2000 м. Симметричность изучаемого объекта – области высокой температуры в форме прямого цилиндра, предопределила воспроизводство картины температурного поля в выполненных расчетах симметричным методом с осью симметрии по оси ординат.

Перечисленные качественные характеристики процесса и массива горных пород позволили сформулировать модель процесса распространения тепла, которая является краевой задачей математической физики для уравнения теплопроводности и найти ее решение [2,3].

Значения изменения температур горных пород в зависимости от указанных параметров изображены на графиках рис. 2, рис. 3.

Графики иллюстрируют четкую картину локального изменения температуры во времени и позволяют оценить величину углубления шахтных

захоронення РАО, то єсть 30°C.

Аналіз результатів виконаних досліджень, зображених на рис.2, рис.3, показує, що збереження постійної температури масива горних порід, розташованих на горизонті випуску 1 можуть забезпечити породи древніх кристалічних формацій, в яких помещен источник високої температури.

При моделюванні процесу радіолітичного газоутворення і накоплення при створенні могильника ОЯТ були прийняті такі допущення:

1) вода, що знаходиться в породах горних порід, в закладочному матеріалі і технічних бар'єрах, неперервно піддається радіолізу, внаслідок високих показувальних поглиненої дози облучення, радіонуклідами РАО; 2) поглинання енергії облучення поровою водою залежить від виду облучення, а саме α - джерела, розглядаються як поверхневий облучатель, коли вся енергія частинок поглинається масивом і розсіюється на його розігрів; енергія, поглиняема водою порового простору, є енергією β - та γ - випромінювання радіонуклідів РАО; 3) кількість енергії від джерел β - і γ - випромінювачів поглинається водою пропорційно електронній частці, а в першому наближенні масовій частці води; 4) швидкість утворення водороду визначається видом випромінювання за допомогою радіаційно-хімічного виходу.

Ураховуючи початковий радіонуклідний склад обробленого ядерного палива [6], для розрахунку його сумарної і удільної активностей було вибрано радіонукліди цезій – стронцієвої групи і довгоживучі елементи трансуранової групи, внесок яких, в зазначені показувальні, є найбільшим. Вибір здійснювався з урахуванням таких визначальних характеристик радіонуклідів, як, потужність дози ($P \cdot \text{см}^2$), сумарна активність (Бк), енергія фотонів (МэВ), квантовий вихід на розпад (%), вихід β частинок i – го переходу (%); гранична енергія спектра β - випромінювання (кэВ); середня енергія спектра β - випромінювання i – го переходу ($\frac{\text{кэВ}}{\beta - \text{част}}$), середня енергія спектра β - випромінювання радіонукліда ($\frac{\text{кэВ}}{\text{распад}}$).

Значення потужності поглиненої водою дози, розраховується, ураховуючи активність радіонуклідів об'єкта могильника РАО, згідно формули [5]

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n A_i \cdot (n_{i,\gamma} \cdot E_{i,\gamma} + n_{i,\beta} \cdot E_{i,\beta}), \quad (1)$$

де для i - го радіонукліда P_i - потужність ($\frac{\text{МэВ}}{\text{г} \cdot \text{с}}$), A_i - удільна активність ($\frac{\text{Ки}}{\text{г}}$), $n_{i,\gamma}$ - квантовий вихід на розпад з випусканням γ - квантів (%), $E_{i,\gamma}$ - енергія γ - квантів (МэВ), $n_{i,\beta}$ - квантовий вихід на розпад з випусканням β - квантів (%), $E_{i,\beta}$ - енергія β - квантів (МэВ).

Радіаційне газовиділення і накоплення моделювалось рівнянням дифузії:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \Delta c + f(M, t), \quad (2)$$

де $c(M, t)$ - кількість молекул радіолітичного газу в одиниці об'єкта могильника РАО в точці $M(x, y, z)$ в момент часу t , D - ефективний коефіцієнт дифузії радіолітичного газу, $f(M, t)$ - функція джерела радіолітичного газу або кількість молекул газу, що утворюються в одиниці об'єкта могильника РАО в одиницю часу в точці $M(x, y, z)$ в момент часу t .

В початковий момент часу, радіолітичний газ відсутній, що в свою чергу, означає виконання тривіального початкового умови

$$c(x, 0) = 0. \quad (3)$$

При виділенні газу за межі могильника, твердої закладки і масива горних порід, відбувається його швидке видалення в оточуючому повітряному просторі. Зазначене умови еквівалентно граничним умовам

$$c(0,t) = c(H,t) = 0, \quad (4)$$

где H - характерный линейный размер могильника ОЯТ.

Задача (2)-(4), которая является смешанной задачей для уравнения с частными производными параболического типа, полностью моделирует процесс изменения во времени концентрации образующегося радиолитического газа.

С учетом полученных результатов решения задачи (2)-(4) значения напряжений, возникающих в объеме могильника и вмещающих пород, вследствие радиолитического газовыделения, вычисляются по газосодержанию согласно формуле [7]

$$\sigma = Q \cdot k \cdot T \cdot c(x,t). \quad (5)$$

В формуле (5) Q - пористость, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура.

Одним из основных материалов, используемых для создания технических барьеров и материалов закладки, является бетон. Бетон - это пористая влагосодержащая среда. Результаты соответствующих расчетов приведены на рис.4, рис.5 и в табл. 1, из которых видно, что 1) динамика изменения концентрации радиолитического газа и напряжений в структуре инженерной защиты могильника РАО имеет наибольшую интенсивность данных процессов на начальной стадии закладки РАО - в период до двадцати лет с последующим ослаблением и стабилизацией их интенсивности 2) напряжение, возникающее в бетоне, примерно за три периода полураспада прямо пропорционально начальной активности захороненного радионуклида.

Отсюда можно сделать вывод, что напряжения, возникающие в бетоне при реальной удельной активности отходов, не могут вызвать появление в нем трещин. Если учесть, что

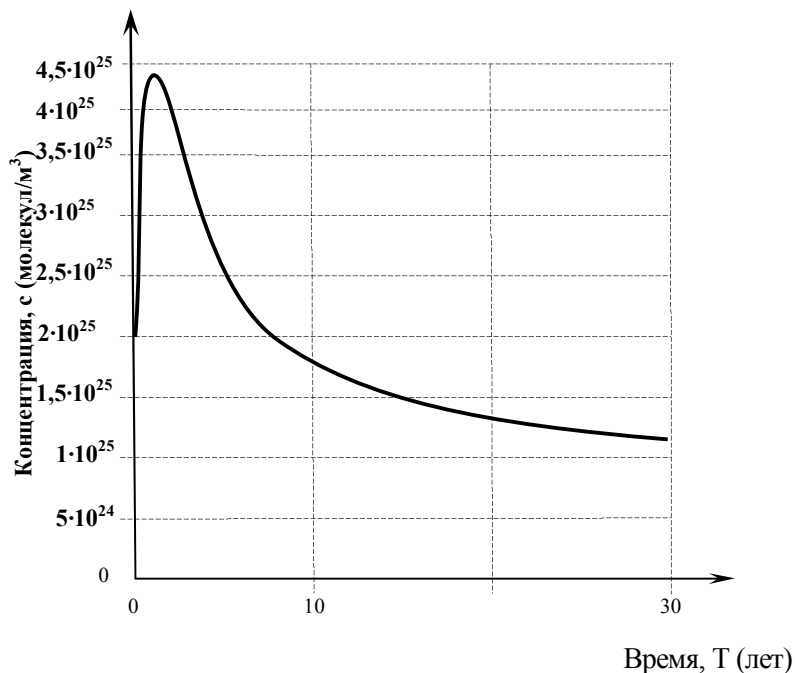


Рис.4. Динамика изменения концентрации радиолитического газа в центре инженерной защиты при свободном выходе газа из бетона.

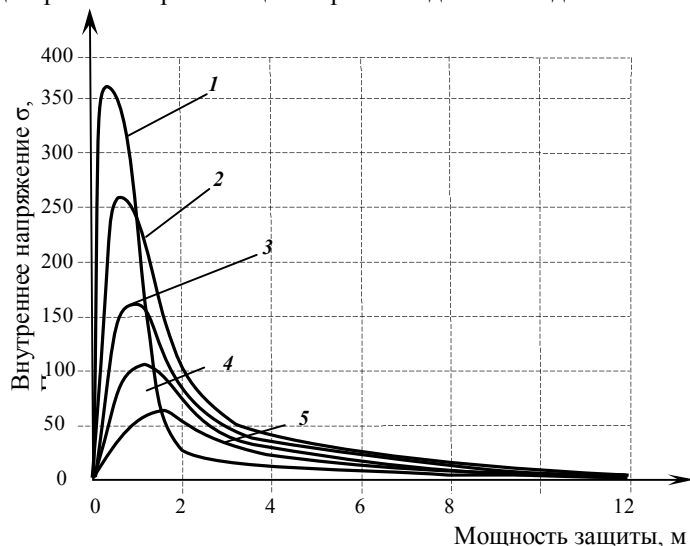


Рис. 5. Зависимость внутренних напряжений в бетоне при радиолитическом газообразовании от мощности защиты во времени: 1 - 1 год; 2 - 5 лет; 3 - 10 лет; 4 - 15 лет; 5 - 25 лет.

допустимые напряжения на растяжение составляют 0,35 МПа для бетона М 200 и 0,15 МПа для бетона М 400, то можно сделать вывод, что эти марки бетонов могут быть использованы для захоронения отходов с начальной удельной активностью до 10^4 Ки/м³ по ¹³⁷Cs. Заметим, что для широкого диапазона горных пород граничное значение параметра предела прочности при

одноосном растяжении находится в границах до значения порядка 10^7 Па. Полученные результаты указывают на то, что под действием радиолитического разложения воды, процессов разрушения внутренней структуры барьеров наблюдаться не будет. Мощность γ -излучения в 2-3 МэВ активной зоны реактора АЭС примерно соответствует мощности γ -излучения ОЯТ, размещенного в могильнике РАО. Мощность защитного барьера из бетона в зависимости от энергии γ -излучения равной 1,75 МэВ и кратности ослабления $k = 20$ составляет 45 см. Видно, что мощности защитных барьеров из бетона составляют первые метры и позволяют снижать мощность γ -излучения ОЯТ в 20 раз. Плотность гранитов значительно выше плотности бетона, следовательно защитные свойства саркофага увеличиваются.

Таблица 1.

Напряжения, возникающие за 90 лет в бетоне под действием ионизирующего облучения РАО содержащих ^{137}Cs

Начальная активность, Ки/м ³	Напряжение в бетоне σ , Па
1,0	9,9
100	990
10000	99000
1 000 000	7 300 000

С учетом полученных результатов, а также руководствуясь необходимостью увеличения защитных свойств саркофага от γ -излучения, мощность саркофага целесообразно принять равную $M = 10$ м. Нетрудно заметить, что геометрические размеры саркофага в плане (ширина и длина) будут превышать аналогичные геометрические размеры инженерной системы для захоронения РАО на 20 м

Выводы. Характер динамики пространственно-временного изменения физико-механических параметров геологической формации вмещающих могильник РАО и закладочного материала разрабатываемого глубоководного месторождения полезных ископаемых носит начальный прогрессирующий характер с дальнейшей угасающей интенсивностью и стабилизацией.

Полученные результаты позволяют сформулировать следующую формулу выявленного эффекта Петровского.

Установлена неизвестная ранее закономерность стабилизации физико-механических параметров горных пород на границах геологических формаций, вмещающих точечные радиоактивные источники, заключающаяся в том, что стабилизация неподвижности изолиний внутренних источников термического поля и поля напряжений Земли, регламентированных естественным радиоактивным распадом элементов рассеянных в земной коре, обусловлена физико-механическим полем горных пород, вызванного радиационно-термическим воздействием точечного радиоактивного источника, экспоненциально убывающего к изолиниям на границах геологической формации.

Список литературных источников

1. IAEA-TECDOC-1323: Institutional framework for long term management of high level waste and / or spent nuclear fuel. – Vienna: IAEA, 2002. –161 p.
2. Закономерность стабилизации температуры горных пород на границах геологических формаций, вмещающих точечные термические источники / Черней Э.И., Постоловский Р.М., Петровский Я.Б. и др. – Рівне: Волин. обереги, 2007. – 867с.
3. Черней Э.И., Петровский Я.Б., Калько А.Д. Результаты моделирования распространения тепла в массивах горных пород, вмещающих могильники РАО // Вісник Рівненського державного технічного університету. – 2002. – Вип.3(16). – С.308-317.
4. Федоров Г.Б., Смирнов Е.А. Диффузия в реакторных материалах. М. - Атомиздат, 1978, – 160 с.
5. Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Радиолит жидкостей и газов. – М.: Наука, 1986. – 440с.
6. Боровой А.А. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» // Атом. энерг. – 2006. – Т.100, вып.4 – С. 259 – 267.
7. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики. – К.: Наукова думка, 1989. – 864с.