УДК 622.28

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, М.А.КАРАСЕВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ПОДЗЕМНОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ГЛИНИСТЫХ ФОРМАЦИЯХ

Приведена классификация радиоактивных отходов по степени их активности. Указаны основные требования к участку строительства хранилища или могильника радиоактивных отходов. Кратко рассмотрены возможные конструктивные решения подземных хранилищ и приведено подробное описание спиралевидной конструкции хранилища РАО. Приведена оценка влияния температуры и радиации на физико-механические свойства бетона и глины. Получен характер распределения температурных полей вокруг подземного хранилища РАО во времени. Произведена оценка напряженно-деформированного состояния крепи и найдены нагрузки на крепь при совместном действии температуры и горного давления с учетом изменения физико-механических свойств бетона и глины.

Classification of nuclear waste was given. The main requirements to the construction site and geological formation of nuclear waste repository are given. The possible construction designs of underground repository are briefly examined and description of spiral like underground repository is written. The estimation of influence of radiation and temperature on clay and concrete is done. The time dependent temperature distribution around underground repository is found. An assessment of stress and strain state of tunnel liner is made and value of liner load is found when the change of clay and concrete mechanical properties and both temperature effect and in-situ stresses are taking into account.

Большую долю в общей мировой энергетической корзине занимает ядерная промышленность, отмечается тенденция увеличения объема использования энергии атома. Проблема утилизации радиоактивных отходов является очень актуальной. Данным вопросом занимаются практически все страны, в которых в той или иной степени представлены объекты атомной промышленности [4, 6-11]. Такие страны как США, Бельгия, Канада, Китай, Финляндия, Франция, Германия, Япония, Россия, Испания, Швеция, Швейцария и Великобритания инвестируют значительные средства в программы обращения с радиоактивными отходами.

Исследователи всего мира сошлись во мнении, что использование подземного пространства является наилучшим выбором для долговременного хранения РАО. Общий подход к созданию подземного хранилища заключается в выборе площадки, пригодной для захоронения РАО, геологической оценке, разработке схемы подземного хранилища, выборе типа контейнера для хранения РАО и других изолирующих материалов, системы транспортировки РАО до потенциального хранилища.

Около 90 % всех произведенных в мире радиоактивных отходов приходится на низкоактивные РАО, но доля их радиоактивного излучения составляет всего около пяти процентов. Эти типы отходов представляют собой строительный мусор, такой как бумага, одежда, чистящие материалы, металлическое и стеклянное оборудование, бетон и железобетон, а также инструменты, применяемые в медицинской индустрии. РАО также образуются при закрытии атомных станций. Все радиоактивные отходы, не являющиеся отработанным ядерным топливом, высокоактивными радиоактивными отходами, отработанными урановыми шахтами, трансурановыми отходами, попадают в категорию низкоактивных. Многие страны

захоранивают низкоактивные короткоживущие отходы в защищенных траншеях мелкого заложения или бетонных бункерах.

Объем высокоактивных радиоактивных отходов незначителен и составляет всего около 3 % от мирового объема, но на них приходится примерно 95 % всего радиоактивного излучения. Все страны, в которых есть высокоактивные РАО, планируют размещать эти материалы в глубоких подземных хранилищах.

В соответствии с санитарными правилами [2, 3] и нормами радиационной безопасности [1] жидкие отходы считаются радиоактивными, если содержание в них радионуклидов или их смесей превышает допустимые концентрации, установленные для воды. По суммарной удельной активности жидкие радиоактивные отходы разделяются на следующие категории:

- слабоактивные – до 1,1 · 105 Ки/л;
- среднеактивные – от 1,1 · 105 до 1 Ки/л;
- высокоактивные – более 1 Ки/л.

Разработка требований к геологическим формациям для размещения РАО проводится во многих странах мира и в России. На основании этих работ МАГАТЭ разработаны принципы безопасности и технические требования.

Геологические формации для размещения хранилищ и могильников РАО должны располагаться в тектонически стабильной зоне земной коры. Формация считается стабильной, если в ней не ожидается недопустимых подвижек в течение 300-500 лет, для ОЯТ и для размещения ВАО – в течение более 104 лет.

Могильники высоко- и среднеактивных РАО размещаются в массивах проницаемостью не выше 104 дарси в блоке горного отвода без тектонических нарушений. Выбранный геологический блок по своим размерам должен вмещать не только горные выработки могильника, но и зону санитарного отчуждения (200-250 м).

Основные требования, предъявляемые к участку строительства хранилища и могильника в тектонически стабильном блоке, сводятся к следующему: сейсмичность района расположения участка не должна превышать 7 баллов по 12-балльной шкале; горный отвод структурного блока должен включать все подземные сооружения и предохранительные и барьерные целики; в пределах горного отвода не должно быть тектонических нарушений, которые могут быть каналами миграции; хранилища и могильники располагают в зонах затрудненного водообмена и застойного режима; участки геологических формаций не должны иметь пластов, жил, зон с высокой проницаемостью; горный массив, вмещающий хранилища и могильники, должен быть монолитным, однородным и надежно изолированным от горизонтов водообмена; геологические формации должны состоять из прочных и устойчивых горных пород, инертных по отношению к физико-химическому воздействию РАО, и обладать свойствами механических барьеров по пути возможной миграции радионуклидов; блок земной коры для размещения хранилищ и могильников РАО должен исключать возможность миграции радионуклидов, представляющих опасность для биосферы в течение 103-104 лет, сохраняя изоляционные свойства системы в этот период; геологическая формация должна иметь средний уровень естественных тектонических напряжений, а влияние трещиноватости массива должно быть сведено к минимуму; горный массив по составу, прочности пород и напряженно-деформированному состоянию должен удовлетворять требованиям для строительства выработок.

Геологические формации должны обладать высокой прочностью, непроницаемостью для жидкостей и газов, высокой термической стойкостью и теплопроводностью, иметь коэффициенты теплового расширения и не изменять свои свойства при воздействии радиации и химических реакций.

Наиболее пригодны для сооружения могильников РАО необводненные слабопроницаемые геологические формации: плотные скальные породы, каменные соли и глины.

Тип и конструкцию хранилища или могильника выбирают на основе анализа гео-

логических, геомеханических, гидрогеологических, тектонических и сейсмических характеристик геологической формации, удобных подъездов и транспортных путей, особенностей рельефа избранной местности, технологического оборудования РАО, социально-экологической обстановки и технико-экономических показателей.

Глубина расположения хранилищ и могильников, параметры несущих конструкций крепи, естественных и искусственных инженерных сооружений определяются из условия сохранения устойчивости массива пород между камерой и поверхностью земли, отсутствия раскрытия трещин и выхода радионуклидов на земную поверхность и геосферу при длительном хранении и воздействии особых внешних динамических нагрузок на земной поверхности.

Подземная изоляция отвержденных и твердых радиоактивных отходов может быть осуществлена [4]: в специально оборудованных выработках рудников, шахт, освободившихся выработках, специальных подземных сооружениях; в специально создаваемых подземных сооружениях, выработках, камерах, скважинах, подземных емкостях; в буровых скважинах различной глубины; в сооружениях приповерхностного типа.

Наиболее универсальной конструкцией для изоляции отвержденных и твердых отходов любых типов и категорий являются подземные сооружения, состоящие из шахтных стволов, транспортных, вентиляционных и других обслуживающих выработок, камер и скважин для размещения отходов [4].

Конструкция подземного хранилища, состоящая из горизонтальных вертикальных и наклонных выработок, хорошо подходит для ее сооружения в глинистых породах. Ряд стран предполагает использование различных глинистых формаций для захоронения, в том числе высокоактивных и отработанного ядерного топлива. Такие работы ведутся в Бельгии, Швейцарии, Франции, США, Италии, Великобритании и др.

Предлагаемая схема компоновочного решения представляет собой спираль, выполненную в виде эллипса (рис.1). Доступ к подземному хранилищу РАО обеспечивается через два вертикальных ствола 1, 2. Транспортный тоннель 4 обеспечивает связь между вертикальными стволами. Проведение тоннеля осуществляется одним механизированным щитом. В дальнейшем проходческий щит используется для проведения спиральных тоннелей. Так как данный тоннель не является замкнутым, появляется возможность проведения всего комплекса спиральных тоннелей без дополнительного монтажа (демонтажа) проходческого оборудования.

Технологическое обслуживание оборудования проводится в специальных камерах. Они располагаются на пути следования тоннеля каждые полспирали. В свою очередь эти камеры соединяются поперечным тоннелем и вся эта система называется транспортно-развязочным узлом 7. Транспортно-развязочные тоннели 5 служат для обеспечения дополнительной связи транспортного тоннеля со спиральными тоннелями, более эффективной схемы проветривания подземного хранилища РАО, а также удобства при размещении контейнеров РАО в камеры. Сервисный ствол 3 может быть построен как в процессе строительства подземного хранилища, так и по окончании строительства и используется только во время эксплуатации подземного сооружения.

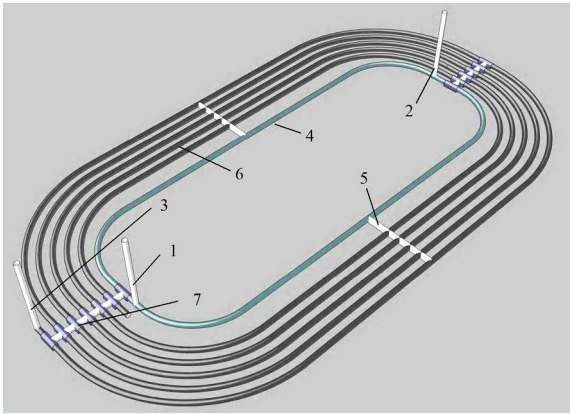


Рис.1. Конструкция подземного хранилища радиоактивных отходов со спиралевидной компоновкой выработок

1 – эксплуатационный ствол; 2 – вентиляционный ствол; 3 – сервисный ствол; 4 – транспортный тоннель; 5 – транспортно-развязочные тоннели; 6 – тоннели для размещения радиоактивных отходов (камеры РАО); 7 – транспортно-развязочный узел

Расстояние между камерами РАО принимается на основании теплового расчета, выбор конструкции крепи – исходя из величины горного давления и тепловой нагрузки на крепь. Количество параллельно расположенных камер РАО определяется объемом радиоактивных отходов, которые необходимо изолировать в данном подземном хранилище. Допустимое расстояние между камерами РАО по данным теплового расчета 25 м и более.

Захораниваемые отходы, инженерные барьеры и окружающий их массив горных пород являются единой системой, обеспечивающей надежность изоляции РАО. Тепловое и радиационное воздействие могут привести к изменению первоначальных характеристик пород и материалов инженерных барьеров, ухудшить их показатели.

Как показывают испытания горных пород и грунтов, температура в значительной степени изменяет их физико-механические свойства. Так при повышении температуры глины до 75-80 °С происходят нежелательные изменения ее свойств. Поэтому поддержание необходимого температурного режима очень важно.

При сравнении параметров прочности и деформационной способности облученных синих глин (по данным проф. Р.Э.Дашко) с синими глинами Санкт-Петербургского региона можно наблюдать отчетливое снижение модуля общей деформации от 2 до 7 раз и сцепления от 0,075-0,117 до 0,0019-0,075 МПа. Ряд исследователей (Hicher, Despax, Robinet) отмечают уменьшение прочностных свойств глины под воздействием температуры (в диапазоне до 100 °С) в 1,5-2 раза. Уменьшение прочности бетона при 60-120 °С составляет 22-30 %. Прочностные характеристики облученного бетона могут снизиться до 2,8 раз [5].

Задача теплопереноса рассматривалась в следующей постановке. Конструкция хранилища в разрезе образует пять параллельно расположенных выработок со следующими граничными условиями. Среднегодовая температура поверхности Земли равна 5 °С и изменяется на 0,02 °С на метр с глубиной. Вертикальные граничные условия моделируются как адиабатические плоскости симметрии. Тепловой поток, возникающий вследствие радиоактивного излучения, приложен как граничное условие к внутренней части металлического контейнера. Это предполагает идеальный теплоперенос тепла от РАО к стенкам контейнера, т.е. наихудший случай с точки зрения величины температуры. Предполагается, что все пространство между контейнерами РАО и крепью камеры заполнено изолирующим материалом. В данном расчете основным механизмом теплопереноса является теплопроводность, а конвекция и излучение не учитываются. Рассматривались модели с расстоянием между камерами 10-50 м.

Величины температур на внешнем контуре крепи и внешнем контуре контейнера являются наиболее важными расчетными величинами, которые определяют наибольшую величину температуры грунтового массива и материала, использующегося в качестве буфера между контейнером РАО и крепью выработки. Предельные величины температурной нагрузки на элементы системы изоляции должны быть определены на основании предварительных исследований.

Анализ результатов расчетов показывает, что наибольшая величина температуры достигается на внешнем контуре контейнера (рис.2). За счет применения изолирующих материалов достигается значительное поглощение тепла. При прохождении через изолирующий слой температура на внешнем контуре крепи падает на 33-81 % от температуры контейнера. Основной параметр, который влияет на величину температуры на внешнем контуре крепи, это теплофизические свойства буферного материала и расстояние между камерами РАО. При данной компоновке камер хранилища РАО наибольшая величина температуры в основном достигается после 10-50 лет хранения РАО. Воздействие тепловыделения РАО на окружающий подземное хранилище РАО массив начинается через 0,5-1,5 лет.

Как показали результаты моделирования, наибольшая тепловая нагрузка приходится на камеру, которая расположена в центре хранилища РАО. Величина тепловой

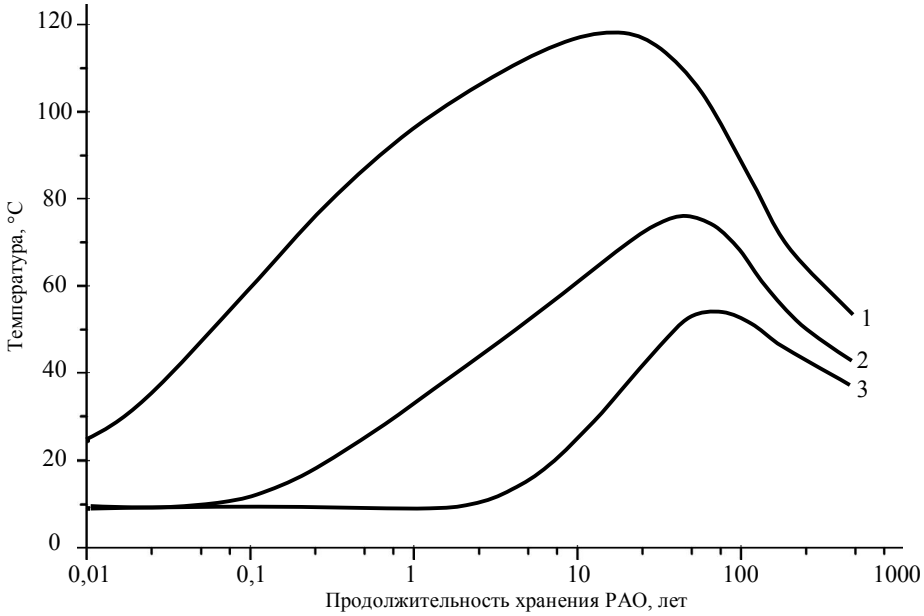


Рис.2. Характер изменения температуры вокруг подземного хранилища в процессе хранения радиоактивных отходов (расстояние между камерами 30 м)

1 – на внешнем контуре контейнера; 2 – на внешнем контуре крепи; 3 – на расстоянии 15 м от камеры РАО

нагрузки тем больше, чем меньше расстояние между камерами РАО. Увеличение температуры массива продолжается на протяжении всех 400 рассматриваемых лет. Температура между камерами выравнивается.

Изменение величины температуры от расстояния между камерами РАО на внешнем контуре крепи и контейнера носит нелинейный характер (рис.2-4). Начиная с 35 м температура контейнера уже практически не уменьшается, т.е. минимальная температура контейнера при данном тепловыделении РАО не понизится ниже 109 °С. Требования к максимально допустимой температуре глинистых формаций начинают выполняться с расстояния между камерами РАО 25 м и более. В данном диапазоне максимальная температура изолирующего материала достигает 120 °С. С увеличением расстояния между камерами РАО увеличивается разница между максимальной температурой на внешнем контуре крепи и внешнем контуре контейнера.

Для того, чтобы оценить степень влияния тепловыделения РАО на температурный режим вокруг хранилища РАО, величина теплового потока менялась в диапазоне 0,5-1,5 по отношению к исходным данным. Результаты расчетов показали, что зависимость изменения температуры от теплового потока как на внешнем контуре контейнера, так и на внешнем контуре крепи носит линейный характер, и с уменьшением величин теплового потока эти две кривые имеют тенденцию сближаться и, наоборот, с увеличением теплового потока разница между температурой на внешнем контуре обделки и внешнем контуре крепи увеличивается.

Полученные результаты распределения температуры вокруг подземного хранилища РАО использованы при решении термопрочностной задачи и нахождения нагрузки на крепь.

Для оценки влияния процессов, связанных с хранением РАО в подземном хранилище (температурное расширение, изменение свойств грунтового массива и материала крепи под действием радиации и температуры), на величину радиальной нагрузки и напряжений, возникающих в крепи камеры РАО, был рассмотрен ряд моделей, анализ которых проводился методом конечных элементов. Грунтовый массив заменен плоскостью с ограниченными размерами. По нижней границе запрещены перемещения по двум направлениям. По боковым

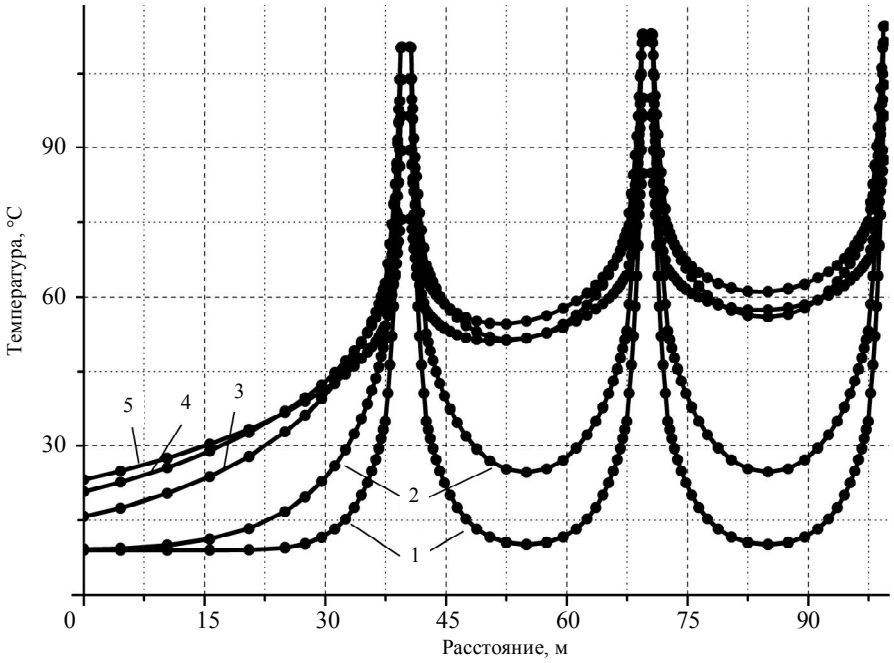


Рис.3. Характер изменения температуры вокруг подземного хранилища в процессе хранения радиоактивных отходов (расстояние между камерами 30 м)

1 – после 1 года хранения; 2 – 5 лет; 3 – 30 лет; 4 – 100 лет; 5 – 400 лет

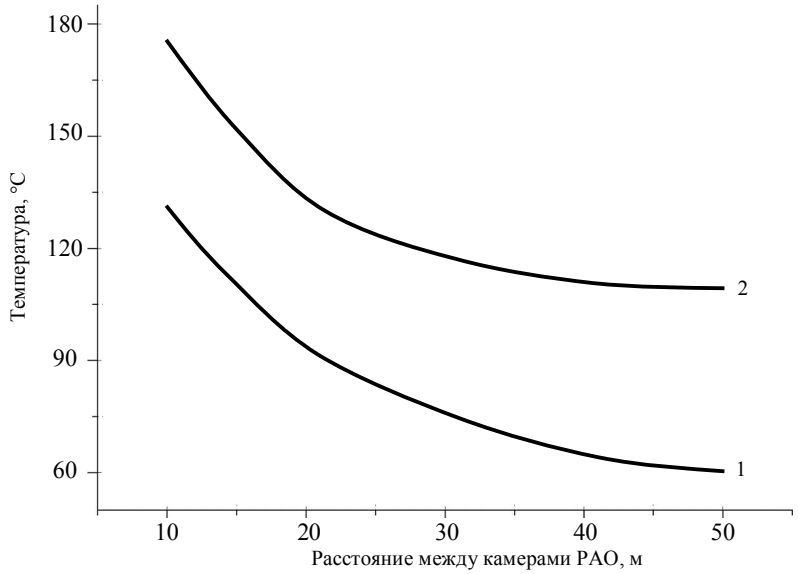


Рис.4. Обобщенная зависимость температуры на внешнем контуре крепи (1) и контейнера (2) от расстояния между камерами РАО

контурам запрещены перемещения по горизонтальной оси. Поверхность грунтового массива остается свободно деформируемой. Выработки представляют собой круглые отверстия. В каждое отверстие вставлено упругое кольцо, моделирующее работу обделки с грунтовым массивом. Диаметр выработки (камеры РАО) равен 5,6 м. В процессе решения менялись следующие параметры: расстояние между камерами РАО, толщина крепи и тепловая нагрузка на грунтовый массив и крепь. При моделировании учитывалась технология проведения камер РАО, изменение свойств материала крепи и массива, воздействие температурной нагрузки.

Расчеты показали, что радиальная нагрузка в своде и боках камеры РАО увеличивается под действием температурного расширения, причем скорость возрастания нагрузки в боках камеры РАО выше, чем в своде (рис.5). Под действием горного давления соотношение радиальной нагрузки в своде с нагрузкой в боках камеры РАО составляет 1,55-1,7. Через год это соотношение изменяется и становится равным 1,2-1,3. Через 30 лет нагрузка по контуру крепи выравнивается. Соотношение между нагрузкой в своде и в боку можно считать равным единице и таким оно остается в промежутке 30-100 лет.

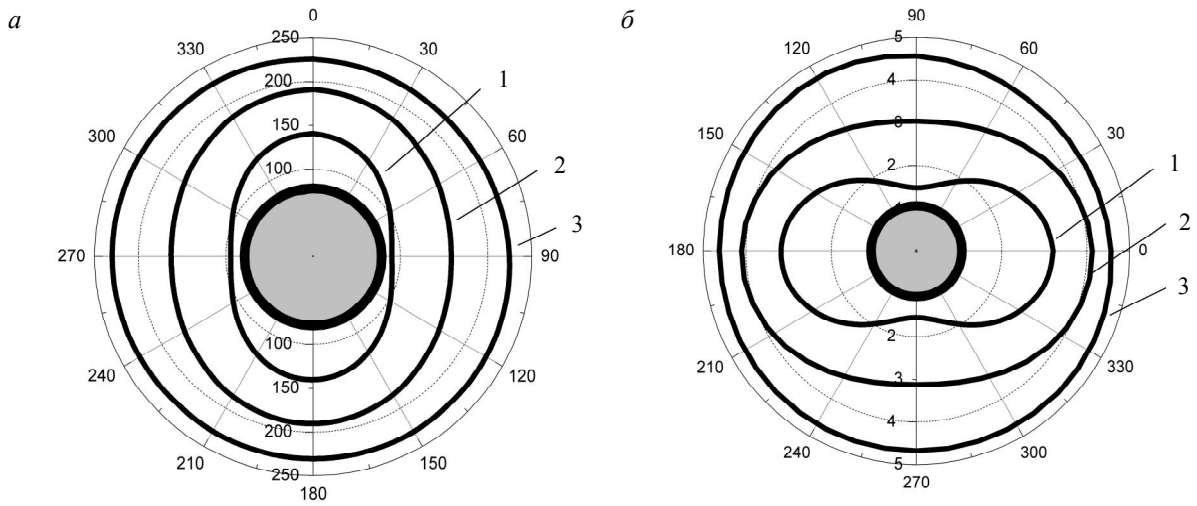


Рис.5. Радиальная нагрузка (*а*) и тангенциальные напряжения (*б*) от горного давления и температуры, МПа

1 – от геостатического нагружения; 2 – после 1 года хранения РАО; 3 – после 30 лет хранения РАО

После проведения горных выработок и установки крепи эпюра тангенциальных напряжений на внутреннем контуре крепи представляет собой эллипс, вытянутый в горизонтальном направлении. Соотношение между напряжениями на внутреннем контуре крепи в боках и в своде равно 2,05-2,2. Изменение температурного режима вокруг хранилища ведет к выравниванию величины тангенциальных напряжений на внутреннем контуре крепи камеры РАО. Через 30 лет распределение тангенциальных напряжений по контуру крепи принимает равномерный характер.

Взаимное расположение камер РАО в значительной степени сказывается на величине радиальной нагрузки (рис.6). С изменением расстояния между камерами РАО с 10 до 50 м величина нагрузки в своде уменьшается на 44 % в центральной камере РАО, на 39 % во второй камере, и на 28 % в крайней камере. Величина нагрузки в боках для тех же условий уменьшается на 54, 40, 36 % соответственно для центральной, второй и третьей камер.

Уменьшение величины нагрузки с увеличением расстояния между камерами РАО в большей степени связано с изменением температурного режима вокруг подземного хранилища и в меньшей со сближением их относительно друг друга.

Увеличение радиальной нагрузки под действием температуры может достигать двукратного значения. Исходя из данных, полученных в тепловом расчете, наиболее вероятное увеличение нагрузки на крепь камеры РАО составит 100 кПа в своде и 160 кПа в боках.

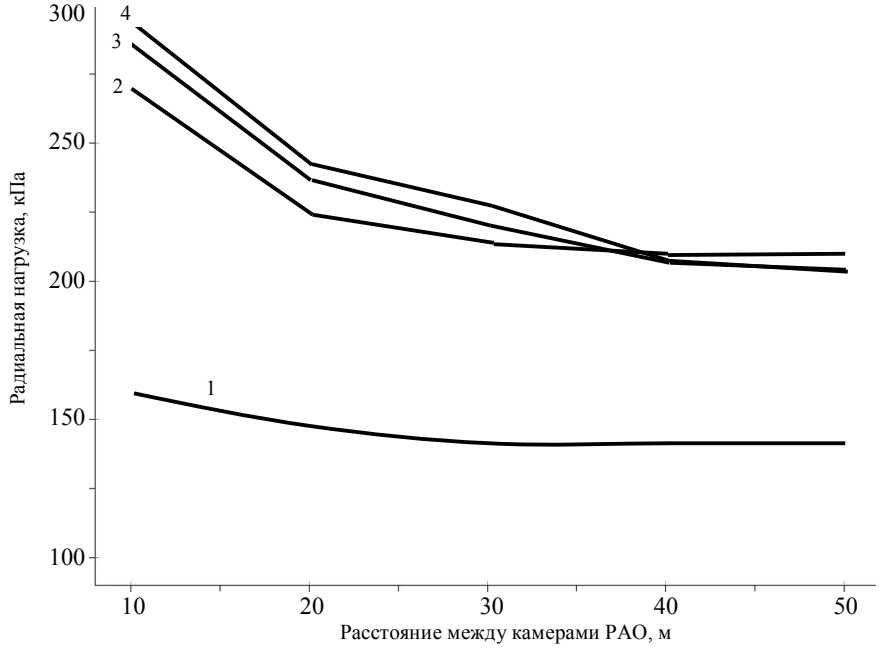


Рис.6. Изменение радиальной нагрузки на крепь камер РАО от расстояния между ними

1 – геостатическое нагружение; 2 – с учетом температурного фактора (центральная камера); 3 – с учетом температурного фактора (вторая камера); 4 – с учетом температурного фактора (третья камера)

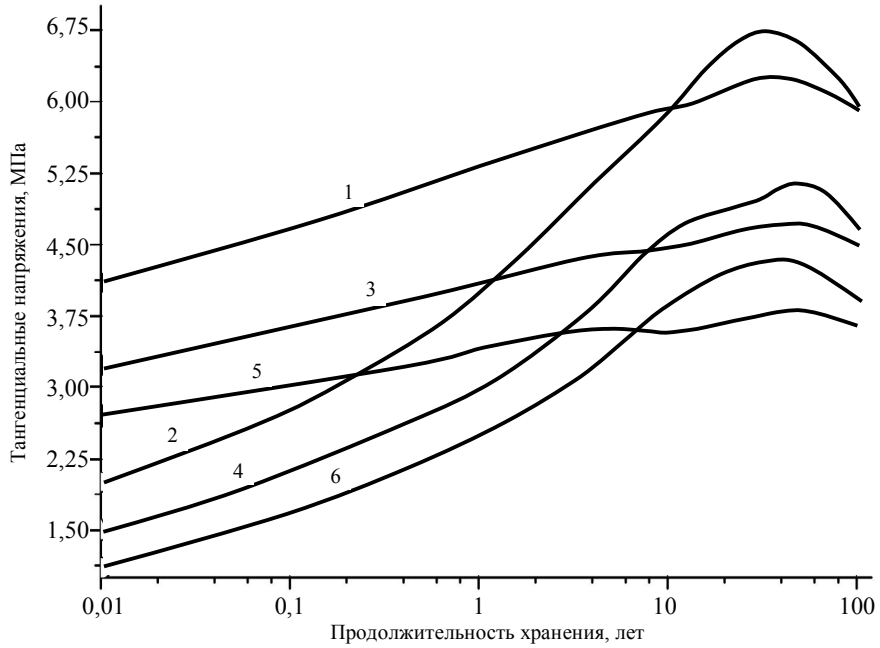


Рис.7. Изменение тангенциальных напряжений на внутреннем контуре крепи камер РАО от ее толщины

1 – толщина крепи 150 мм (в боках выработки); 2 – 150 мм (в своде выработки); 3 – 250 мм (в боках); 4 –250 мм (в своде); 5 – 350 мм (в боках); 6 – 350 мм (в своде)

Максимум величины тангенциальных напряжений можно связать с температурной нагрузкой вокруг подземного хранилища. Максимальные напряжения в боках камеры РАО соответствуют максимальной тепловой нагрузке крепи, так как в основном вызваны эффектом температурного расширения. В своде камеры РАО тангенциальные напряжения продолжают расти, так как помимо температурного расширения материала крепи они в такой же степени подвергаются дополнительной нагрузке от грунтового массива, которая в свою очередь вызвана деформациями массива вследствие теплового расширения.

Уменьшение толщины крепи, при прочих равных условиях, ведет к увеличению напряжений в ней. Результаты моделирования показывают (рис.7), что при совместном действии температуры и горного давления наблюдается схожая картина, но величина тангенциальных напряжений возрастает тем быстрее, чем меньше толщина крепи. При толщине крепи 350 мм величина тангенциальных напряжений увеличивается на 25-27 %, а при толщине 150 мм на 35-38 %, что составляет разницу всего в 10 %. За исключением этого, изменение толщины крепи не оказывает влияния на характер формирования нагрузки на крепь и характер изменения тангенциальных напряжений во времени.

Результаты термопрочностного расчета совместно с результатами расчета теплопереноса могут быть использованы при обосновании параметров крепи камер подземного хранилища РАО и расположения камер относительно друг друга.

В заключение можно сделать вывод, что изоляция РАО в геологических формациях – вопрос чрезвычайно сложный и требует совместной работы специалистов из разных областей науки. В статье затронуты лишь некоторые вопросы геомеханического анализа подземных сооружений для хранения РАО. Было уделено внимание вопросам математического моделирования и анализу результатов термопрочностной задачи с изменением физико-механических свойств материалов. Дальнейшие исследования предполагают разработку единой модели материала, которая бы позволила в явном виде учитывать воздействие температуры и радиации на характер деформирования бетона и глины. Создание подземной лаборатории и проведение натурных исследований также позволит обогатить знания о поведении массива и лучше понять, как работает та или иная конструкция крепи в условиях действия повышенной температуры и воздействия радиации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нормы радиоактивной безопасности НРБ-76/87. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками тонизирующих излучений ОСП-72/78. М.: Энергоатомиздат, 1988.

2. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных электростанций СП АЭС 79 / Ин-т биофизики Минздрава СССР. М., 1981.

3. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами / Минздрав СССР. М., 1986.

4. *Щищиц И.Ю.* Основы инженерной георадиоэкологии / МГГУ. М., 2005.

5. *Dubrovsky V.B.*, et al., Radiation damage of ordinary concrete, Atomic Energy, Vol.23, No.4, 1967, pp.310-316.

6. Nuclear Waste Management of the Olkiluoto and Loviisa Power Plants: Programme for Research, Development and Technical Design for 2004-2006. TKS-2003. Posiva Oy. 2003.

7. *Chapman N.A., Gera F., Mittempergher M., Tasion E.* Disposal of RaWaste in Italian Argillaceous Formations. Proc. Symp. Hanower, 1986. – IAEA. Vienna, 1986.

8. Conceptual Design for a Deep Geological Repository for Used Nuclear Fuel. 1106/MD18085/REP/01. 2002.

9. Technical-scientific contributions on the topic of nuclear waste management. NAGRA. Bulletin № 35. 2004.

10. Technical overview of the SAFIR 2 report. NI-ROND 2001-05-E. 2001.

11. Yucca Mountain Science and Engineering Report. Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration. Revision 1. DOE/RW-0539-1. U.S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management. 2002.