КОНЦЕПЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ПИЛ В НИЖНЕКАНСКОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Е. В. Моисеенко, Н. И. Дробышевский, Р. А. Бутов, Ю. Н. Токарев

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2020 г.

При численном моделировании термомеханических процессов в пункте глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) требуются сведения о свойствах вмещающей породы и инженерных барьеров безопасности (ИББ) на масштабах десятков сантиметров, метров и более. При этом экстраполяция значений, измеряемых на образцах малого размера в наземных лабораториях, приводит к избыточным неопределенностям. Также на поведение материалов влияют условия, достоверно не воспроизводимые в наземной лаборатории, такие как обводненность или исходное напряженно-деформированное состояние. Для изучения поведения вмещающей породы и ИББ при нагреве в условиях, близких к реализующимся в ПГЗРО, и оценки термомеханических свойств в крупном масштабе планируются следующие эксперименты. В эксперименте по изучению термомеханики зоны разуплотнения будет исследоваться поведение укрепленных стен и сводов тоннелей в условиях нагрева. Экспериментальная установка будет состоять из двух участков тоннеля, направленных параллельно выработкам ПГЗРО. В результате будет определено пространственное распределение значений термомеханических параметров зоны разуплотнения и их изменение вследствие нагрева. Второй эксперимент посвящен изучению поведения массива пород в условиях пространственно неоднородного нестационарного нагрева. Установка будет состоять из двух вертикальных скважин с нагревателями. Эксперимент будет проходить в несколько этапов: исследование массива пород в исходном состоянии, оценка основных термомеханических параметров пород, изучение временной эволюции пространственного распределения напряжений, вызванных трехмерными градиентами температуры, исследование процессов во вмещающей породе при ее остывании и обводнении. После завершения экспериментов по исследованию отдельных групп явлений должен быть проведен интегральный эксперимент для изучения этих явлений в совокупности с учетом их взаимного влияния. Полученные результаты будут использоваться для уточнения данных для численного моделирования и диапазонов их неопределенностей, а также для валидации расчетных средств.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, глубинное захоронение, термомеханика, эксперименты, подземная исследовательская лаборатория, вмещающие породы, инженерные барьеры безопасности.

Введение

Для моделирования теплофизических и механических процессов в ПГЗРО необходимы достоверные сведения о свойствах вмещающей породы и материалов ИББ. При этом вмещающий массив неоднороден как по составу слагающих пород, так и по структуре: он может иметь трещины, полости, зоны дробления и т. д. Эта неоднородность приводит к значительной неопределенности в оценке свойств массива в целом, причем исследование образцов малого размера — порядка нескольких сантиметров — не может дать реалистичной оценки. Если влияние неоднородности состава на теплофизические свойства, в принципе, может быть учтено при наличии достаточно большого количества образцов, то исследование влияния механических повреждений возможно лишь при рассмотрении масштабов не менее десятков сантиметров, а желательно — метров и более. То же относится и к механическим свойствам массива, которые существенно зависят от состояния пород.

Также неопределенность привносят и горнопроходческие работы. При проведении буровзрывных работ (БВР) появляются дополнительные повреждения окружающих пород. Впоследствии при укреплении проходок каверны и трещины заполняются бетоном, что приводит к появлению пространственно неоднородной среды. Ее свойства зависят как от исходного состояния массива, так и от организации и способа выполнения проходческих работ и могут быть надежно исследованы исключительно непосредственными измерениями. Хотя существуют стохастические методы, позволяющие оценить трещиноватость в зоне воздействия БВР, результирующая неопределенность без предварительных экспериментальных исследований будет слишком высока. После начала заполнения ПГЗРО эта неоднородная среда будет подвергаться воздействию тепловых нагрузок, что в результате различия термомеханических параметров бетона и вмещающей породы будет приводить к возникновению дополнительных механических напряжений. Это может спровоцировать эволюцию уже имеющихся трещин и появление новых, и в результате — негативно сказаться как на прочностных, так и на изолируюших свойствах ИББ.

Для оценки значений термомеханических параметров массива пород в крупном масштабе предлагается проведение двух экспериментов в ПИЛ, сооружающейся в Нижнеканском массиве, направленных на изучение теплового и напряженно-деформированного состояния (НДС) в условиях нагрева:

- эксперимент по оценке воздействия тепла и силового напряжения на зону разуплотнения (EDZ), укрепленные своды и стены проходок (термомеханика EDZ);
- эксперимент по оценке воздействия тепла и силового напряжения на вмещающие породы (термомеханика пород).

Кроме того, планируется крупномасштабный интегральный эксперимент, в котором будут, в частности, окончательно отрабатываться и проверяться используемые при захоронении технологии. Этот эксперимент также позволит проверить надежность прогнозирования расчетно-программными комплексами термомеханических, химических, переносных и прочих явлений с учетом их взаимосвязей. В нем также существенную роль будет играть термомеханика, поскольку температурой среды во многом определяется протекание в ней процессов, а механические нагрузки являются одним из ключевых факторов, определяющих целостность ИББ.

Термомеханика EDZ

Первый эксперимент нацелен на исследование поведения укрепленных стен и сводов тоннелей в условиях нагрева. При укреплении стен и сводов бетон проникает в каверны и трещины зоны разуплотнения, создавая неоднородную среду. Это особенно актуально для участков проходок, попадающих в зоны повышенной трещиноватости. В этих зонах укрепление грунтов может проводиться еще до буровзрывных работ, как правило, закачкой бетона под высоким давлением в предварительно просверливаемые скважины. При этом бетон может проникать по трещинам вглубь породы на несколько десятков сантиметров. Массив горных пород, вмещающий сооружения ПГЗРО, подвергается нагреву. При этом вследствие достаточно сложного трехмерного поля температур [1, 2] наряду со сжимающими напряжениями возникают заметные сдвиговые. Это может привести к деформации и, возможно, повреждению укрепленных стен и сводов. Дополнительным источником неоднородности напряжений будут являться металлические элементы, применяемые при укреплении проходок.

Следует отметить, что это является качественным описанием воздействия нагрева на укрепленную зону дробления. Для получения сколько-нибудь надежной численной оценки напряжений и деформаций требуются детальные сведения о геометрии трещин, фактических свойствах породы и бетона, исходной картине напряжений в массиве горных пород.

Существуют подходы к моделированию НДС зоны разуплотнения [3, 4], основанные на стохастических методах генерации трещин, но они требуют предварительного экспериментального исследования трещиноватости EDZ для получения исходных данных и должны быть валидированы в экспериментах, проведенных в реалистичных условиях. Следовательно, их применение в любом случае требует экспериментального исследования массива, в котором планируется захоронение РАО.

Трещиноватость EDZ существенно зависит от ориентации проходки относительно главных напряжений массива пород [5]. Следовательно, для получения результатов, релевантных условиям ПГЗРО, при проведении эксперимента должны использоваться проходки, ориентированные к направлениям главных напряжений так же, как выработки в проекте. То есть, экспериментальная установка должна состоять из двух перпендикулярных участков тоннеля, направление которых будет соответствовать транспортнотехнологической выработке и камерам захоронения, а их длина должна составлять около 5 м. Участки должны находиться в области с высокой трещиноватостью вмещающей породы и, соответственно, проводится ее укрепление. Желательно, чтобы они были расположены близко друг к другу, тогда наблюдаемые на них различия в напряжениях и перемещениях будут определяться исключительно ориентацией тоннелей относительно главных напряжений, а не свойствами породы.

Проходки ПГЗРО будут иметь сечение, близкое к показанному на рис. 1, с горизонтальным полом и арочным сводом. Представляют интерес термомеханические процессы во всем сечении, поэтому требуется нагревать участки вблизи пола, на вертикальной стене и вблизи свода тоннеля. Для этого предлагается в стены тоннелей вмонтировать источники тепла (по 4 на участок) мощностью 1-1,5 кВт каждый. Ориентировочное расположение источников, показанное красным цветом на рис. 2, является предварительным и будет уточняться по результатам расчетов, как и требуемая мощность. Кроме того, будут буриться инструментальные скважины (показаны на рисунке желтым цветом) для размещения датчиков. Продолжительность эксперимента ориентировочно составит 1—3 года. По предварительной оценке, расстояние до других источников тепла и механических напряжений должно составлять не менее 10 м.

В результате экспериментального исследования будет определено пространственное распределение значений механических параметров зоны разуплотнения, в первую очередь напряжений, перемещений и возможных повреждений, и их изменение в результате нагрева. Кроме того, должен будет проводиться отбор проб материала для исследования в наземной лаборатории, прежде всего для оценки прочностных свойств до и после нагрева. Отдельный интерес представляет ультразвуковое исследование зоны дробления до укрепления породы для сравнения ее состояния с тем, которое будет после укрепления и нагрева. Для этого потребуется координация с проходчиками при сооружении выработок, так как первые ультразвуковые измерения должны будут проводиться на этапе проходки. Важность измерений геофизическими методами, включая ультразвуковые, определяется тем, что для исследований на сжатие в наземной лаборатории используются неповрежденные керны. В то же время исследования, проведенные в ПИЛ ONKALO [6], показывают незначительное изменение микротрещиноватости неповрежденных образцов. Геофизические же методы обнаруживают заметное изменение свойств в макроскопическом масштабе в результате горнопроходческих работ. Это может быть связано с динамикой более крупных трещин, не проявляющейся на неповрежденных образцах.

Аналогичную цель — исследование укрепленной бетоном зоны разуплотнения — преследует In Situ Concrete Spalling Experiment в лаборатории ONKALO (Финляндия) [7]. Оно проводится на доработанной установке эксперимента POSE, представляющей собой вертикальную скважину во вмещающей породе с укрепленными



Рис. 1. Предполагаемое сечение проходок ПГЗРО: 1 — набрызг-бетонная крепь, 2 — зона разуплотнения, 3 — неповрежденная порода



Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования термомеханических процессов в зоне разуплотнения

бетоном стенками и размещенными в породе вокруг нее нагревателями.

Отметим, что поскольку эксперимент в ONKALO делается на вертикальной проходке, то, с учетом зависимости напряжений и повреждений в зоне разуплотнения от направления проходки, указанный и предлагаемый нами эксперименты будут дополнять друг друга.

Термомеханика пород

Следующий эксперимент посвящен изучению поведения массива вмещающих пород в условиях пространственно неоднородного нестационарного нагрева. Предварительные расчеты показывают [1, 2], что в результате тепловыделения ВАО в нескольких скважинах на стадии прогрева вмещающих пород возникнут значительные температурные градиенты. Следовательно, наряду со сжимающими напряжениями могут возникнуть и высокие сдвиговые. Так, предварительные оценки эффективных (фон Мизеса) напряжений для конфигурации ПГЗРО с размещением ВАО в длинных вертикальных скважинах дают величины более 10 МПа. При этом типичные значения прочности на сдвиг для гнейсов составляют десятки МПа, то есть речь идет о значениях одного порядка величины. Соответственно, требуется экспериментальное исследование, чтобы:

- получить оценку температур и напряжений в породе при нагреве, характерном для захораниваемых ВАО;
- оценить значения термомеханических параметров массива пород в макроскопическом масштабе для последующего использования в расчетах;
- проверить точность численного моделирования поля температур и НДС массива пород.

В противном случае будет невозможно получить надежную оценку распределения напряжений и деформаций массива пород в ПГЗРО, необходимую для обоснования его безопасности.

Эксперименты такого рода уже проводились, например, в Швеции (Äspö Pillar Stability Experiment, APSE [8], внешняя секция Äspö Prototype Repository, APR [9, 10]). Сходные цели преследовал эксперимент POSE в ПИЛ ОNКАLО [11, 12]. Их результаты могут использоваться при планировании экспериментальной программы в отечественной ПИЛ, но не могут служить непосредственно для обоснования безопасности ПГЗРО, поскольку состав и свойства горных пород будут различаться.

Недавние исследования тепловых свойств горных пород [13] Нижнеканского массива

показали, что их неопределенность может быть выше, чем предполагалось ранее. В справочниках (см., например, [14, 15]) приводятся характерные значения теплопроводности для гнейсов свыше 2,5 Вт/(м·К). Аналогичные оценки получены и при исследовании гранитоидов, составляющих массив пород, в котором расположена шведская ПИЛ Äspö [16]. В то же время в [13] на основании измерений высушенных образцов, полученных при бурении скважин, приводится оценка теплопроводности пород 0,8 Вт/(м·К). При этом отмечается, что столь низкие значения могут быть вызваны влиянием дефектов на крупных образцах, и при заполнении дефектов водой можно ожидать значения теплопроводности 2,5 Bт/(м·К) и выше. Какими бы ни были причины столь больших различий, представляется критически важным исследование свойств горных пород Нижнеканского массива на большом масштабе, по крайней мере нескольких метров, и в условиях реальной обводненности.

Предлагаемая конфигурация экспериментальной установки показана на рис. 3. Установка будет состоять из двух вертикальных скважин с 1-2 имитаторами контейнеров (ИК) с ВАО каждая, расположенных на расстоянии 4-6 м. Для каждой скважины длина обогреваемого участка будет составлять 3-6 м. Мощность нагрева должна составлять 2-9 кВт на скважину в зависимости от конфигурации установки. Отметим, что расстояние между скважинами в экспериментальной установке будет меньше, чем предполагается в ПГЗРО, а тепловыделение — несколько выше. Это сделано для того, чтобы обеспечить более быстрый прогрев породы. Диаметр скважин должен соответствовать проектному, в настоящее время это 1,3 м, что необходимо для того, чтобы обеспечить вблизи нагревателей реалистичные тепловые потоки. Также потребуется набор вертикальных и, возможно, наклонных инструментальных скважин (ИС, показаны на рис. 3 желтым цветом) для



Рис. 3. Конфигурация экспериментальной установки для изучения термомеханики пород

каротажных исследований и расположения датчиков. При этом часть ИС должна быть создана до начала бурения скважин для нагревателей, что позволит исследовать изменение механических свойств породы при бурении скважин большого диаметра. Имитаторы контейнеров будут иметь упрощенную структуру: металлический корпус и нагревательные элементы (возможно, дополнительные конструкционные детали), при этом должен быть обеспечен тепловой контакт между нагревателями и породой. Это делается для того, чтобы уменьшить влияние дополнительных факторов, в первую очередь тепловых сопротивлений, на нестационарный процесс нагрева породы. Предлагается предусмотреть резервирование нагревательных элементов, чтобы минимизировать влияние их возможного отказа на ход эксперимента, как это было сделано в проекте CROP (GRS) [17].

В результате эксперимента будет получено пространственное распределение температуры и значений механических параметров пород (напряжения, перемещения, сейсмические проявления, скорость прохождения ультразвука и т. д.) и их изменение во времени в результате тепловых и механических воздействий, в том числе при бурении скважин для захоронения РАО. На основании этих данных будут оценены основные параметры массива пород: теплопроводность, теплоемкость, модуль Юнга, коэффициент теплового расширения, трещиноватость и т. д., которые впоследствии будут использованы при численном моделировании термомеханических процессов в ПГЗРО. Поскольку тепловые свойства породы могут существенно зависеть от ее обводненности, в течение эксперимента должно детектироваться наличие или отсутствие воды в местах, где проводятся измерения.

Эксперимент будет проводиться в несколько этапов. На подготовительном этапе проводится бурение скважин и исследование исходного состояния массива пород, а также картографирование имеющихся в массиве трещин. В первую очередь бурятся вертикальные инструментальные скважины, при этом проводится отбор проб для определения термомеханических параметров породы в наземной лаборатории. В этих скважинах выполняются каротажные исследования, после чего размещается оборудование для измерения термомеханических параметров и определяется исходное состояние массива. Кроме того, интерес будет представлять изучение пространственного распределения значений теплофизических характеристик породы

вблизи поверхности скважин. Это может осуществляться, в частности, методом оптического сканирования [18], что потребует разработки соответствующего оборудования для использования этого метода в условиях ПИЛ. Таким образом, будут получены оценки неопределенности тепловых свойств для нескольких масштабов: фрагмент керна, отдельная скважина, область массива пород. Сопоставление этих оценок позволит развить подходы к экстраполяции значений свойств, измеренных на отдельных образцах, на протяженные области массива пород, что необходимо для численного моделирования.

Расположение инструментальных скважин должно быть таким, чтобы обеспечивать возможность ультразвукового исследования зоны разуплотнения, образующейся в процессе сооружения скважин для нагревателей. Пример такого расположения в эксперименте APR [10] приведен на рис. 4. Оно позволяет измерить скорость прохождения ультразвука как в непосредственной близости от скважины для нагревателя (например, между ИС 1 и 3), так и на удалении (между ИС 1 и 2). На рисунке пути, по которым проводится измерение скорости ультразвука, показаны пунктирной линией. Несколько инструментальных скважин должны быть пробурены также в необогреваемой части выработки для отслеживания возможных изменений в массиве пород, не связанных с нагревом. Затем бурятся скважины для размещения нагревателей. После этого проводится измерение параметров массива геофизическими методами для того, чтобы оценить влияние на них процесса сооружения скважин большого диаметра. Также следует рассмотреть возможность бурения из скважин для нагревателей нескольких горизонтальных инструментальных скважин малого диаметра, а также вертикальной — по оси. Их возможное расположение на примере эксперимента APR [10] показано на рис. 5. После монтажа датчиков размещаются имитаторы контейнеров с нагревателями. Окончательное расположение и размеры скважин будут определяться на основании предварительного численного моделирования эксперимента. Кроме того, оно будет зависеть от конфигурации ПГЗРО.

На первом этапе длительностью 1—2 года проводится оценка основных термомеханических параметров пород. Для этого включается нагрев в одной скважине, в результате чего поле температур и напряжений будет иметь достаточно простую и предсказуемую форму. На основании проводимых на этом этапе измерений будут оцениваться термомеханические



Рис. 4. Расположение вертикальных инструментальных скважин (1—4) в эксперименте АРР [10]

Рис. 5. Расположение инструментальных скважин, сооружаемых после скважины для нагревателя, в эксперименте APR [10]

параметры массива пород в макромасштабе. Будут проведены многовариантные численные термомеханические расчеты с варьированием значений свойств, используемых в качестве входных данных. При помощи эвристических оптимизационных методов [19] будут найдены такие значения, при которых расчетные поля температур и напряжений наиболее близки к экспериментальным, как это делалось для гидрогеологических и геохимических моделей [20, 21].

На втором этапе длительностью 3-5 лет нагрев будет идти в обеих скважинах. На этом этапе будет исследоваться временная эволюция пространственного распределения напряжений, вызванных трехмерными градиентами температуры. Таким образом, будет изучено состояние массива пород в условиях, близких к тем, которые будут реализовываться в ПГЗРО. Полученные результаты — температуры, напряжения и перемещения — могут использоваться для валидации расчетных средств, применяемых для численного моделирования термомеханических процессов в ПГЗРО, в частности кода FENIA [22]. На этом этапе следует сравнивать результаты измерений в обогреваемой и необогреваемой частях экспериментальной установки для того, чтобы отделить влияние нагрева на напряженно-деформированное состояние массива от его эволюции, вызванной прочими причинами, например процессом сооружения ПИЛ в целом.

Общая продолжительность эксперимента составит 5—7 лет. В результате воздействия механических напряжений, вызванных нагревом, может измениться конфигурация трещин, особенно вблизи скважин. Это может привести к изменениям тепловых и прочностных свойств породы. Для оценки этих изменений по окончании эксперимента должны быть вновь проведены исследования тепловых свойств породы оптическими методами и отобраны пробы для изучения в наземной лаборатории с последующим сравнением с результатами, полученными до начала эксперимента. Также должно быть вновь проведено картографирование трещин, чтобы оценить влияние нагрева на эволюцию трещиноватости массива пород. Кроме того, в процессе остывания и связанного с ним обводнения массива пород должны продолжаться измерения состояния массива.

Интегральный эксперимент

После завершения экспериментальной программы исследования отдельных групп явлений (термомеханика пород, поведение ИББ, гидрогеология, микробиология и т.д.) должен быть проведен интегральный эксперимент, в котором рассмотренные явления будут изучаться в совокупности, с учетом их взаимного влияния. При этом окончательная схема экспериментальной установки (глубина скважин, их расположение и расстояние между ними, материалы и конфигурация ИББ и т.д.) будет диктоваться принятой концепцией захоронения ВАО.

С точки зрения термомеханики интегральный эксперимент будет являться расширением предыдущего, как по масштабу, так и по спектру исследуемых явлений. В частности, наряду с влиянием нагрева на состояние массива пород в нем будет изучаться влияние разбухания бентонита при обводнении на НДС пород и ИББ, механическая прочность ИББ, в том числе ИК, в натурных условиях. ИК при этом должны быть по структуре близки к предполагаемым для использования в ПГЗРО. Важной частью исследования будет проверка и подтверждение возможности надежно моделировать процессы в ПГЗРО расчетными средствами с сопряженными моделями. Наряду с термомеханикой будут изучаться и прочие процессы: гидравлические, химические ит.д.

Чтобы получить полностью трехмерную пространственную картину исследуемых процессов, наиболее близкую к той, которая будет в ПГЗРО, предлагается использовать систему из 4 скважин (рис. 6). Поскольку прогрев скального массива на глубину 10—20 м, как в проекте ПГЗРО, потребует значительного времени, предлагается уменьшить расстояние между скважинами. Окончательно схема интегрального эксперимента должна быть определена по итогам



Рис. 6. Возможная конфигурация интегральной экспериментальной установки

экспериментов, посвященных исследованию отдельных явлений, с учетом технических возможностей по созданию экспериментальной установки.

Такого рода эксперименты, отражающие концепцию и апробирующие технологии будущего захоронения, проводятся и в зарубежных ПИЛ. В частности, в ПИЛ Äspö в рамках эксперимента Äspö Prototype Repository (APR) [23] изучается поведение ИББ и горных пород ближней зоны с точки зрения теплофизических явлений, транспорта воды и газов, химических и микробиологических процессов. Экспериментальная установка состоит из участка тоннеля с шестью (4 — во внутренней секции и 2 — во внешней) вертикальными скважинами диаметром 1,75 м и глубиной около 8 м. В скважинах размещались контейнеры с нагревателями, причем контейнеры соответствовали тем, которые предполагается использовать при захоронении РАО. Промежутки между контейнерами и стенками скважин заполнялись буферными блоками из прессованного бентонита. Измерительная аппаратура позволяет регистрировать давление породы и поровой воды, насыщение водой и высыхание буферных материалов, температуру ИББ и породы, накопление газов в буферном материале, химические и биологические процессы. Эксперимент был начат в 2001 году, внешняя секция была разобрана в 2010—2011 годах, мониторинг внутренней секции будет идти по крайней мере до 2020 года включительно.

Выводы

Описанные эксперименты, планируемые в Нижнеканской ПИЛ, позволят получить оценки значений тепловых и механических параметров вмещающих пород в крупном масштабе (несколько метров). Это позволит уточнить значения, полученные на образцах малого размера в наземных лабораториях, и развить методики масштабирования таких значений на большие области породы. Кроме того, эксперименты позволят в натурных условиях исследовать изменение свойств пород в результате нагрева, с сопутствующим ему изменением поля механических напряжений, а также проходческих работ. Еще одним важным аспектом исследований будет обводненность пород в реалистичных условиях в разных режимах — интенсивного нагрева, как в начале эксплуатации ПГЗРО, и при последующем остывании. Обводненность пород может оказывать заметное влияние на их теплофизические свойства.

Интегральный эксперимент позволит изучить поведение всех компонентов системы захоронения в условиях, максимально приближенных к реализующимся в ПГЗРО. С точки зрения термомеханики пород и ИББ наибольший интерес в рамках этого эксперимента представляют эволюция ИББ при совокупном воздействии нагрева, гидростатического давления и разбухания бентонита, а также поведение массива пород в условиях неоднородного разогрева. При этом будут возникать сложные градиенты температур, приводящие к возникновению высоких напряжений, потенциально близких к пределу прочности породы [24]. Результаты интегрального эксперимента будут использованы как для проверки и окончательной доработки подходов и технологий, используемых при захоронении ВАО, так и для валидации расчетных средств, применяемых при моделировании процессов в ПГЗРО.

В настоящей статье приведено общее описание планируемых экспериментов и не затрагивались вопросы, связанные с выбором измерительного оборудования и его расположением в инструментальных скважинах. Они будут решаться на основе численного моделирования, в том числе с анализом неопределенностей и чувствительности, как и вопросы выбора прочих характеристик экспериментальной установки. В [25] продемонстрирован такой численный анализ, на основании которого проранжировано влияние отдельных параметров установки и характеристик породы на поле температур и напряжений в эксперименте по изучению термомеханики пород. Также отдельного рассмотрения требует выработка подходов к отбору в рамках экспериментальной программы кернового материала для изучения в наземной лаборатории. Кроме того, для экспериментов потребуется создание специализированного оборудования: нагревателей, средств бесконтактного определения тепловых свойств породы и т. д.

Литература

1. Butov R. A., Drobyshevsky N. I., Moiseenko E. V., Tokarev Yu. N. 3D numerical modelling of the thermal state of deep geological nuclear waste repositories // Journal of Physics: Conference Series 899 (2017), 052002.

2. Дробышевский Н. И., Моисеенко Е. В., Бутов Р. А., Токарев Ю. Н. Трехмерное численное моделирование теплового состояния пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве горных пород // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 66—75.

3. Alcolea A., Kuhlmann U., Marschall P. 3D modelling of the excavation damaged zone around HLW/ ILW tunnels and shafts using a marked point process technique // 7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, September 24—27, 2017, Davos, Switzerland.

4. *Onoe H., Ozaki Y., Iwatsuki T.* Modeling the Groundwater Recovery Experiment in Tunnel with a Discrete Fracture Network // DECOVALEX 2019 Symposium on Coupled Processes in Radioactive Waste Disposal and Subsurface Engineering Applications, November 4—5, 2019, Brugg, Switzerland.

5. *Mánica M. et al.* Analysis of localized deformation around deep excavations in argillaceous rocks // 7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, September 24–27, 2017, Davos, Switzerland.

6. *Kovács D., Dabi G., Toth T., Kiuru R.* EDZ Study Area in ONK-TKU-3620: Discrete Fracture Network Based Modelling of Microcrack Systems in Drill Core Specimens and Comparisons with Petrophysical Measurements. Working Report 2016-56. Posiva Oy. November 2019. 78 p.

7. *Siren T.* ONKALO in Situ Concrete Spalling Experiment — Fracture Mechanics Prediction. Working Report 2013-48. Posiva Oy. October 2015. 24 p.

8. *J. Christer Andersson*. Äspö Pillar Stability Experiment. Final report. Rock mass response to coupled mechanical thermal loading. TR-07-01. Svensk Kärnbränslehantering AB. January 2007. 220 p.

9. *Lönnqvist M., Hökmark H.* Thermal and thermomechanical evolution of the Äspö Prototype Repository rock mass. Modelling and assessment of sensors data undertaken in connection with the dismantling of the outer section. R-13-10. Svensk Kärnbränslehantering AB. January 2015. 179 p.

10. *Svemar C., Johannesson L.-E., Grahm P., Svensson D.* Prototype Repository. Opening and retrieval of outer section of Prototype Repository at Äspö Hard Rock Laboratory. Summary report. TR-13-22. Svensk Kärnbränslehantering AB. January 2016. 236 p. 11. Johansson E., Siren T., Hakala M., Kantia P. ONKALO POSE Experiment — Phase 1&2: Execution and Monitoring. Working Report 2012-60. Saanio & Riekkola Oy, Posiva Oy, KMS Hakala Oy, Geofcon Oy. February 2014. 130 p.

12. *Valli J., Hakala M., Wanne T., Kantia P., Siren T.* ONKALO POSE Experiment — Phase 3: Execution and Monitoring. Working Report 2013-41. Pöyry Finland Oy, KMS Hakala Oy, Saanio & Riekkola Oy, Geofcon Oy, Posiva Oy. January 2014. 182 p.

13. *Озерский А. Ю*. Опыт исследования теплофизических свойств пород архейского массива // Сергеевские чтения. Выпуск 21. Пермь, 2019. С. 93—99.

14. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Мельникова Н. В., Протодьяконова М. М., Ржевского В. В. М. : Недра, 1975. 279 с.

15. *Андерсон Е. Б. и др*. Подземная изоляция радиоактивных отходов / Под ред. В. Н. Морозова. М. : «Горная книга», 2011. 592 с.

16. *P.-E. Back, J. Wrafter, J. Sundberg, L. Rosén.* Thermal properties. Site descriptive modelling Forsmark — stage 2.2. R-07-47. Svensk Kärnbränslehantering AB. September 2007. 228 p.

17. *Rothfuchs T. et al.* CROP. Cluster repository project. German Country Annexes. GRS - 201. Gesell-schaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. June 2004. 178 p.

18. *Popov Y., Beardsmore G., Clauser C., Roy S.* ISRM suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure // Rock Mech Rock Eng. 2016. N° 49. P. 4179–4207.

19. *Gendreau M. et al.* (ed.). Handbook of metaheuristics. Springer, 2019. ISBN: 978-3-319-91086-4.

20. Valetov D., Neuvazhaev G., Svitelman V., Saveleva E. Hybrid Cuckoo Search and Harmony Search Algorithm and Its Modifications for the Calibration of Groundwater Flow Models // Proceedings of the 11th International Joint Conference on Computational Intelligence: SCITEPRESS — Science and Technology Publications, 2019. ISBN: 978-989-758-384-1.

21. Romanchuk A., Larina A., Semenkova A., Svitelman V., Blinov P., Kalmykov S. Sorption of radionuclides onto minerals surfaces: new approach to the modelling // Proceedings of the 17th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere. 15–20 Sept., Kyoto, Japan, 2019.

22. Бутов Р. А., Дробышевский Н. И., Моисеенко Е. В., Токарев Ю. Н. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород при размещении в нем пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов и визуализация результатов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 11 (специальный выпуск 37). С. 343—354. 23. *Svemar C., Pusch R.* Prototype Repository. Project description. FIKW-CT-2000-00055. IPR-00-30. Svensk Kärnbränslehantering AB. November 2000. 59 p.

24. Абрамов А. В., Бекетов А. П., Рыкованов Г. Н., Хрулев А. Н., Чернявский А. О. Оценка влияния действующих факторов на тепловое и напряженное состояние пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов: Препринт № 262. Снежинск, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2019.

25. Горелов М. М., Дробышевский Н. И., Моисеенко Е. В., Савельева Е. А., Свительман В. С. Анализ чувствительности численной модели эксперимента «Термомеханика пород» в условиях ПИЛ // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 92—100. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-92-100.

Информация об авторах

Моисеенко Евгений Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: moi@ibrae.ac.ru.

Дробышевский Николай Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: drobyshevsky@inbox.ru.

Бутов Роман Александрович, инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: bra@ibrae.ac.ru.

Токарев Юрий Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: ytokarev@ya.ru.

Библиографическое описание статьи

Моисеенко Е. В., Дробышевский Н. И., Бутов Р. А., Токарев Ю. Н. Концепция проведения крупномасштабных термомеханических экспериментов в ПИЛ в Нижнеканском массиве горных пород // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 101—111. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-101-111.

CONCEPT OF LARGE-SCALE THERMOMECHANICAL URL EXPERIMENTS IN THE NIZHNEKANSKIY ROCK MASSIF

Moiseenko E. V., Drobyishevsky N. I., Butov R. A., Tokarev Yu. N.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on April 8, 2020

Numerical simulation of thermomechanical processes in a deep underground radioactive waste repository requires information on the host rock and the engineered barriers properties at a scale of dozens of centimeters, meters and more. However, the extrapolation of the values obtained on small-scale samples in surface laboratories yields excessive uncertainties. The materials behavior is also influenced by conditions that cannot be reliably reproduced in a surface laboratory, such as water content or initial stress-strain state. Following experiments are planned to study

Модели для анализа безопасности пунктов захоронения РАО

the host rock and the engineered barriers behavior during heating under conditions similar to those expected in the repository, as well as to assess their large-scale thermomechanical properties. In the experiment focused on the excavation damaged zone thermal mechanics, the behavior of reinforced drift walls and vaults under heating will be studied. The experimental facility will involve two drifts with the same orientation as the planned repository ones. As a result, the spatial distribution of excavation damaged zone thermomechanical parameters and their evolution due to heating will be identified. The second experiment focuses on the host rock mass behavior under spatially nonuniform unsteady heating. The facility will feature two vertical boreholes with heaters. The experiment will be divided into several stages: study of the host rock initial state, estimation of the rock main thermomechanical properties, study of the temporal evolution of the stress field due to 3D temperature gradients and of the processes in the host rock occurring during its cooling and re-saturation with water. Following the completion of the separate-effect test program, an integrated experiment should be carried out to study the coupled processes with respect to their mutual influence. The obtained results will be used to refine the values of input parameters for numerical simulations and their uncertainty ranges, as well as to validate the computer codes.

Keywords: radioactive waste, deep geological repository, thermal mechanics, experiment, underground research laboratory, host rock, engineered barriers.

References

1. Butov R. A., Drobyshevsky N. I., Moiseenko E. V., Tokarev Yu. N. 3D numerical modelling of the thermal state of deep geological nuclear waste repositories. *Journal of Physics: Conference Series* 899 (2017), 052002.

2. Drobyshevskij N. I., Moiseenko E. V., Butov R. A., Tokarev Yu. N. Trekhmernoe chislennoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya punkta glubinnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov v Nizhnekanskom massive gornyh porod [Three-dimensional numerical modelling of the thermal state of the deep radioactive waste disposal facility in the Nizhnekansk granitoid massif]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 66–75.

3. Alcolea A., Kuhlmann U., Marschall P. 3D modelling of the excavation damaged zone around HLW/ ILW tunnels and shafts using a marked point process technique. *7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement,* September 24–27, 2017, Davos, Switzerland.

4. Onoe H., Ozaki Y., Iwatsuki T. Modeling the Groundwater Recovery Experiment in Tunnel with a Discrete Fracture Network. *DECOVALEX 2019 Symposium on Coupled Processes in Radioactive Waste Disposal and Subsurface Engineering Applications*, November 4–5, 2019, Brugg, Switzerland.

5. Mánica M. et al. Analysis of localized deformation around deep excavations in argillaceous rocks. 7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, September 24–27, 2017, Davos, Switzerland.

6. Kovács D., Dabi G., Toth T., Kiuru R. *EDZ Study Area in ONK-TKU-3620: Discrete Fracture Network Based Modelling of Microcrack Systems in Drill Core Specimens and Comparisons with Petrophysical Measurements.* Working Report 2016-56. Posiva Oy. November 2019. 78 p. 7. Siren, T. *ONKALO in Situ Concrete Spalling Experiment — Fracture Mechanics Prediction*. Working Report 2013-48. Posiva Oy. October 2015. 24 p.

8. J. Christer Andersson. *Äspö Pillar Stability Experiment*. Final report. Rock mass response to coupled mechanical thermal loading. TR-07-01. Svensk Kärnbränslehantering AB. January 2007. 220 p.

9. Lönnqvist M., Hökmark H. *Thermal and thermomechanical evolution of the Äspö Prototype Repository rock mass. Modelling and assessment of sensors data undertaken in connection with the dismantling of the outer section.* R-13-10. Svensk Kärnbränslehantering AB. January 2015. 179 p.

10. Svemar C., Johannesson L.-E., Grahm P., Svensson D. *Prototype Repository. Opening and retrieval of outer section of Prototype Repository at Äspö Hard Rock Laboratory.* Summary report. TR-13-22. Svensk Kärnbränslehantering AB. January 2016. 236 p.

11. Johansson E., Siren T., Hakala M., Kantia P. *ONKALO POSE Experiment — Phase 1&2: Execution and Monitoring.* Working Report 2012-60. Saanio & Riekkola Oy, Posiva Oy, KMS Hakala Oy, Geofcon Oy. February 2014. 130 p.

12. Valli J., Hakala M., Wanne T., Kantia P., Siren T. *ONKALO POSE Experiment — Phase 3: Execution and Monitoring.* Working Report 2013-41. Pöyry Finland Oy, KMS Hakala Oy, Saanio & Riekkola Oy, Geofcon Oy, Posiva Oy. January 2014. 182 p.

13. Ozerskiy A. Yu. *Opyt issledovaniya teplofizicheskih svojstv porod arhejskogo massiva* [Experience in studying the thermophysical properties of rocks of the Archean massif]. XXI Sergeev's Reading. Perm, 2019. Pp. 93–99.

14. *Spravochnik kadastr fizicheskikh svoistv gornykh porod* [Handbook (cadastre) of physical properties of rocks]. Ed. Melnikov N. V., Protodiakonov M. M., Rzhevskiy V. V. Moscow, Nedra Publ., 1975. 279 p.

15. Anderson E. B et al. *Podzemnaia izoliatsiia radioaktivnykh otkhodov* [Underground isolation of radioactive waste]. Ed. Morozov V. N. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2011. 592 p.

16. Back P.-E., Wrafter J., Sundberg J., Rosén L. *Thermal properties. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2.* R-07-47. Svensk Kärnbränslehantering AB. September 2007. 228 p.

17. Rothfuchs T. et al. *CROP. Cluster repository project*. German Country Annexes. GRS — 201. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. June 2004. 178 p.

18. Popov Y., Beardsmore G., Clauser C., Roy S. ISRM suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure *// Rock Mech Rock Eng.*, 2016, no. 49, p. 4179–4207.

19. Gendreau M. et al. (ed.). *Handbook of metaheuristics*. Springer, 2019. ISBN: 978-3-319-91086-4.

20. Valetov D., Neuvazhaev G., Svitelman V., Saveleva E. Hybrid Cuckoo Search and Harmony Search Algorithm and Its Modifications for the Calibration of Groundwater Flow Models. *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Computational Intelligence.: SCITEPRESS.* Science and Technology Publications, 2019. ISBN: 978-989-758-384-1.

21. Romanchuk A., Larina A., Semenkova A., Svitelman V., Blinov P., Kalmykov S. Sorption of radionuclides onto minerals surfaces: new approach to the modelling. *Proceedings of the 17th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere*. 15– 20 Sept., 2019, Kyoto, Japan. 22. Butov R. A., Drobyshevsky N. I., Moiseenko E. V., Tokarev Yu. N. Chislennoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyh porod pri razmeshchenii v nem punkta glubinnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov i vizualizaciya rezultatov [Numerical modelling of the stress-strain state of the rock mass when placing a deep radioactive disposal site in it and result visualization]. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten*, 2019, no. 11, special issue 37, pp. 343–354.

23. Svemar C., Pusch R. *Prototype Repository. Project description*. FIKW-CT-2000-00055. IPR-00-30. Svensk Kärnbränslehantering AB. November 2000. 59 p.

24. Abramov A. V., Beketov A. P., Rykovanov G. N., Hrulev A. N., Chernyavskiy A. O. *Ocenka vliyaniya dejstvuyushchih faktorov na teplovoe i napryazhennoe sostoyanie punkta glubinnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov* [Assessment of the influence of existing factors on the thermal and stress state of the deep radioactive waste disposal facility]. Preprint no. 262. Snezhinsk, RFYAC-VNIITF Publ., 2019.

25. Gorelov M. M., Drobyshevskiy N. I., Moiseenko E. V., Saveleva E. A., Svitelman V. S. Analiz chuvstvitel'nosti chislennoj modeli eksperimenta «Termomekhanika porod» v usloviyah PIL [Sensitivity Analysis for the Numerical Model of the "Rock thermomechanics" Experiment under URF Conditions]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 92–100. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-92-100.

Information about the authors

Moiseenko Evgeny Viktorovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: moi@ibrae.ac.ru.

Drobyishevsky Nikolay Ivanovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: drobyshevsky@inbox.ru.

Butov Roman Aleksandrovich, Engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: ibrae@ibrae.ac.ru.

Tokarev Yuriy Nikolaevich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: ytokarev@ya.ru.

Bibliographic description

Moiseenko E. V., Drobyishevsky N. I., Butov R. A., Tokarev Yu. N. Concept of Large-scale Thermomechanical URL Experiments in the Nizhnekanskiy Rock Massif. *Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 101–111. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-101-111.