

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-81-89>
УДК 621.039

КОНЦЕПЦИЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РЕАКТОРА БН-350 В ГЛУБОКИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ

Д.И. Абулгазиева*, К.С. Садыков, Л.П. Дерябина, В.А. Поспелов, А.Г. Коровиков

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: davydenko@nnc.kz*

В статье рассматриваются концептуальные проектные решения по окончательному захоронению отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реактора БН-350. Выполнен анализ технологий окончательного захоронения ОЯТ без переработки, включая шахтные пункты захоронения и глубокие скважины в твердых породах. Рассмотрены концептуальные проектные решения подземной лаборатории, конструктивные особенности подземных комплексов, организация проходческих работ, инженерная инфраструктура и транспортно-технологические схемы обращения с контейнерами, содержащими ОЯТ. Представлены основные характеристики наземных и подземных сооружений, объемы горнопроходческих работ, параметры шахтных стволов и технологических площадок. Показано, что применение многоуровневой системы инженерных и геологических барьеров обеспечивает долгосрочную радиационную безопасность и минимизацию риска миграции радионуклидов в биосферу.

Ключевые слова: *отработавшее ядерное топливо, БН-350, пункт захоронения радиоактивных отходов, глубокое геологическое захоронение, подземная лаборатория, глубокие скважины.*

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и высокоактивными радиоактивными отходами (ВАО) является одной из наиболее сложных и долгосрочных задач современной атомной энергетики. Для Республики Казахстан данная проблема имеет особое значение в связи с необходимостью обеспечения безопасного обращения с ОЯТ реактора БН-350 и определения оптимального варианта его окончательного захоронения. ОЯТ реактора БН-350 характеризуется высокой радиационной активностью, тепловыделением и представляет потенциальную опасность для биосферы. Поэтому для его окончательного захоронения необходимы инженерные решения, обеспечивающие надежную изоляцию радиоактивных материалов на длительный период. Такой подход должен учитывать особенности обращения с ОЯТ БН-350 и требования к его долговременной изоляции.

После остановки реакторной установки БН-350 в Республике Казахстан возникла необходимость безопасного обращения с более чем 2800 отработавшими тепловыделяющими сборками. В рамках программы вывода из эксплуатации осуществляется их долговременное хранение с последующей проработкой вариантов окончательного захоронения.

Согласно подходам Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), наиболее безопасным и устойчивым решением для окончательной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов является глубокое геологическое захоронение в стабильных геологических формациях, обеспечивающее многоуровневую систему естественных и инженерных ба-

рьеров. Данный подход минимизирует вероятность миграции радионуклидов в биосферу и обеспечивает долгосрочную безопасность без необходимости активного контроля со стороны человека [1,2].

Международная практика подтверждает эффективность данного метода. Так, в Финляндии реализуется проект глубокого геологического захоронения «Онкало» (Onkalo) в районе АЭС Олкилуото, который считается первым в мире промышленным объектом окончательного захоронения ОЯТ, рассчитанным на изоляцию радиоактивных материалов на срок до 100 000 лет. В Соединенных Штатах Америки ведется эксплуатация подземного комплекса Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) для захоронения трансураниевых отходов в соляных формациях, а также рассматривается проект Yucca Mountain как потенциальное хранилище высокоактивных отходов. Во Франции реализуется национальная программа Cigéo, предполагающая захоронение радиоактивных отходов на глубине около 500 метров в глинистых формациях [3,4]. Указанные проекты демонстрируют различные геологические и инженерные подходы к долгосрочной изоляции радиоактивных материалов. Для настоящей работы международный опыт используется как основа для выбора и обоснования инженерных решений, применимых к окончательному захоронению ОЯТ реактора БН-350.

В мировой практике также развиваются альтернативные концепции, включая захоронение в глубоких скважинах, создание специализированных подземных исследовательских лабораторий и применение многоуровневых систем инженерных барьеров (кон-

тейнеры, буферные материалы, геологическая среда), обеспечивающих последовательное снижение риска миграции радионуклидов [5].

В Республике Казахстан вопросы обращения с радиоактивными отходами регулируются законом «Об использовании атомной энергии» [6], а также подзаконными актами, устанавливающими требования к выбору площадок размещения ядерных установок и объектов захоронения [7]. Дополнительно применяются нормы и руководства МАГАТЭ, включая стандарты безопасности по захоронению радиоактивных отходов, мониторингу и долгосрочному контролю объектов ядерного наследия [1,8].

Методы исследования

Разработка концепции захоронения ОЯТ реактора БН-350 осуществлена с учетом международного опыта исследований в области обращения с радиоактивными материалами. При этом рассмотренные подходы адаптируются к условиям и задачам окончательного захоронения ОЯТ БН-350. За десятилетия развития атомной энергетики была сформирована комплексная система требований к пунктам захоронения радиоактивных отходов, направленная на обеспечение долговременной радиационной и экологической безопасности. Основной задачей таких объектов является надежная изоляция радиоактивных веществ от биосферы на протяжении длительных временных интервалов, достигающих десятков и сотен тысяч лет.

В качестве базовой концепции для окончательного захоронения ОЯТ реактора БН-350 рассматривается глубокое геологическое захоронение в стабильных горных породах. Данный подход предполагает размещение контейнеров с ОЯТ в подземных сооружениях на глубине нескольких сотен метров. Основной целью рассматриваемой концепции захоронения ОЯТ БН-350 является предотвращение миграции радионуклидов в окружающую среду в течение длительного периода. Для этого предусматривается сочетание инженерных и естественных барьеров. При этом особое значение имеет выбор площадки размещения объекта, который должен учитывать не только геологические и гидрогеологические характеристики, но и политические, социальные, экологические и экономические факторы. Для реализации концепции окончательного захоронения ОЯТ БН-350 рассматриваются различные типы стабильных геологических сред. К ним относятся гранитные и кристаллические породы, каменная соль, глинистые формации, а также метаморфические и отдельные виды осадочных пород. Выбор конкретной геологической среды должен основываться на результатах комплексных исследований и оценке ее пригодности для размещения ОЯТ БН-350.

Создание пункта захоронения ОЯТ представляет собой многоэтапный процесс. Он включает предварительный выбор площадки, экологическую и кон-

цептуальную оценку территории, исследование геологической среды и разработку проектных решений. Далее выполняются лицензирование, строительство и эксплуатация объекта. Завершающим этапом является закрытие объекта с обеспечением его долговременной изоляции. Одним из наиболее сложных этапов является подтверждение пригодности геологического массива для размещения подземного комплекса.

В рассматриваемой концепции захоронения ОЯТ БН-350 используется принцип многоступенчатой защиты, предусматривающий применение нескольких взаимодополняющих барьеров безопасности. Такая система должна обеспечить последовательное снижение вероятности выхода и миграции радионуклидов из зоны захоронения. Для ОЯТ в качестве первого инженерного барьера предусматривается матрица, в которой фиксируются радиоактивные вещества. В качестве материалов матрицы применяются цемент, битум, фосфатные и боросиликатные стекла, обеспечивающие удержание радионуклидов и снижение вероятности их выхода за пределы системы хранения. Концепция захоронения ОЯТ БН-350 не предусматривает предварительную переработку и, следовательно, помещения продуктов переработки ОЯТ в первичную матрицу.

Элементом защиты для окончательного размещения ОЯТ БН-350 служит металлический контейнер, предназначенный для долговременной герметизации радиоактивных материалов. Для изготовления контейнеров предусматривается использование нержавеющей стали, углеродистой стали и медных сплавов. В ряде проектных решений применяется система двойных контейнеров, обеспечивающая дополнительную защиту от коррозионных процессов и механических воздействий.

В концепции захоронения ОЯТ БН-350 важным компонентом системы безопасности является буферный материал, размещаемый между контейнером и массивом горных пород. Наиболее широко используется бентонитовая глина, обладающая низкой водопроницаемостью и высокой сорбционной способностью. Бентонит ограничивает проникновение подземных вод, перераспределяет механические напряжения, компенсирует возможные подвижки пород, снижает тепловое воздействие на окружающий массив и способствует абсорбции радионуклидов в результате миграционных процессов [9-11].

Последним и основным естественным барьером выступает геологическая среда - массив горных пород, обеспечивающий долговременную изоляцию отходов от биосферы. Основными требованиями к геологической среде являются низкая водопроницаемость, тектоническая стабильность, высокая механическая прочность, устойчивость к температурным воздействиям и минимальная вероятность миграции радионуклидов.

Следует отметить, что оценка свойств горных пород исключительно на основе лабораторных исследований является недостаточной. Для получения достоверных данных о поведении геологической среды в условиях размещения радиоактивных отходов требуется проведение комплексных исследований в подземных лабораториях, расположенных непосредственно в ненарушенных массивах пород. Проведение таких исследований позволяет оценить гидрогеологические, геомеханические и геохимические характеристики массива, а также подтвердить долговременную безопасность проектируемого пункта захоронения ОЯТ [12].

При разработке решений по обращению с ОЯТ БН-350 необходимо учитывать его остаточное тепловыделение и соответствующие температурные условия хранения и размещения [13].

Концепция захоронения в пункте захоронения шахтного типа

В рамках проекта захоронения ОЯТ реактора БН-350 рассмотрена концепция создания подземной исследовательской лаборатории, предназначенной для подтверждения пригодности выбранного геологического массива к окончательному захоронению отработавшего ядерного топлива. Создание подобного объекта рассматривается как один из ключевых этапов реализации проекта глубинного геологического захоронения, поскольку проведение исследований

непосредственно в ненарушенном массиве горных пород позволяет получить достоверные данные о поведении геологической среды в условиях длительного размещения радиоактивных материалов. При выборе места размещения подземной лаборатории учитываются геологические, гидрогеологические, экологические, техногенные, а также социально-экономические факторы.

Основным назначением подземной лаборатории в рамках проекта захоронения ОЯТ БН-350 является проведение комплексных исследований геологической среды и процессов, способных влиять на долговременную безопасность размещения топлива. Полученные результаты должны использоваться для оценки пригодности выбранного массива пород и обоснования проектных решений по захоронению ОЯТ БН-350. В рамках эксплуатации лаборатории предусматривается изучение агрессивности поровых вод, исследование коррозионной активности среды, выполнение геохимического моделирования, а также анализ взаимодействия радиоактивных отходов с окружающим массивом пород. Проведение подобных исследований позволяет оценить устойчивость инженерных барьеров, скорость возможных коррозионных процессов и вероятность миграции радионуклидов в геологической среде. Принципиальное устройство подземной опытной лаборатории приведено на рисунке 1.

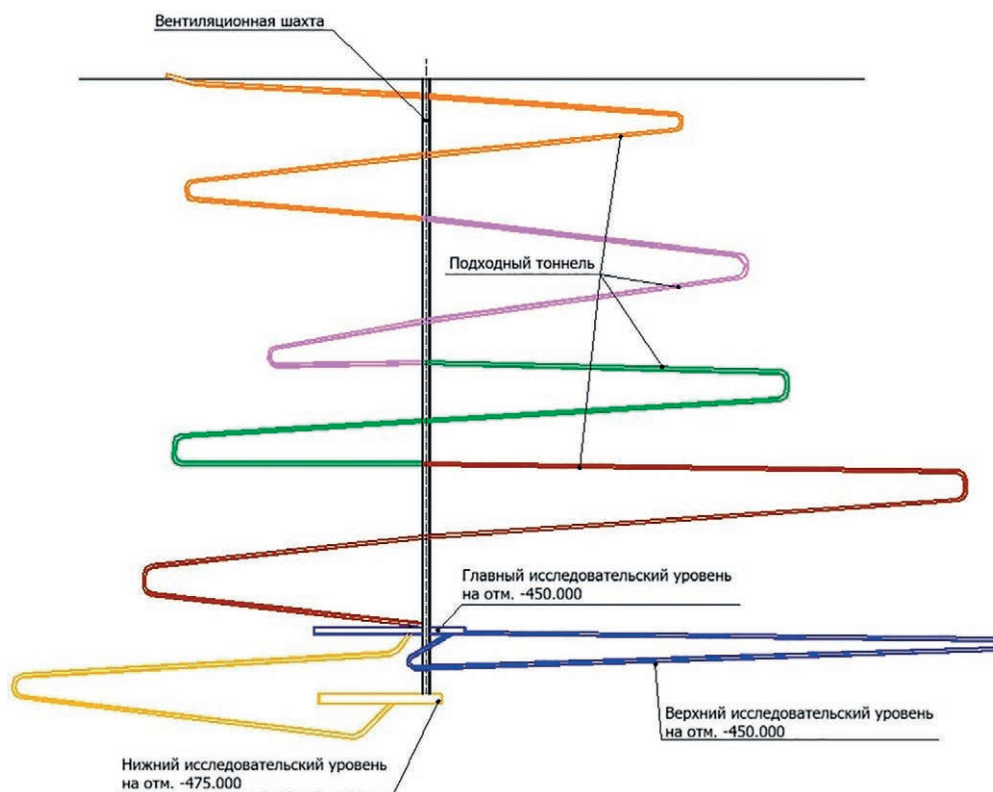


Рисунок 1. Схема подземной лаборатории

Согласно проектным решениям, подземная лаборатория должна функционировать в течение нескольких десятков лет, обеспечивая непрерывное накопление научных данных и проведение долговременных наблюдений за состоянием геологического массива. В состав подземного комплекса входят основные сооружения, включающие спиральный подходной тоннель протяженностью около 5 км, вентиляционную шахту, а также двухуровневый исследовательский комплекс, расположенный на глубинах 450 и 475 м. Такая схема размещения позволяет проводить исследования на различных горизонтах массива и оценивать изменение свойств пород в зависимости от глубины залегания.

Для выполнения научных исследований и мониторинга состояния геологической среды проектом предусматривается бурение специальных ниш и исследовательских скважин вдоль тоннелей. Данные выработки предназначены для проведения геомеханических, гидрогеологических и геохимических исследований, а также для контроля параметров массива пород в процессе эксплуатации подземной лаборатории.

Для окончательного захоронения ОЯТ реактора БН-350 рассмотрен шахтный вариант пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) с вертикальным размещением контейнеров. Данный вариант предусматривает размещение контейнеров в вертикальных скважинах, расположенных в подземных туннелях (рисунок 2).

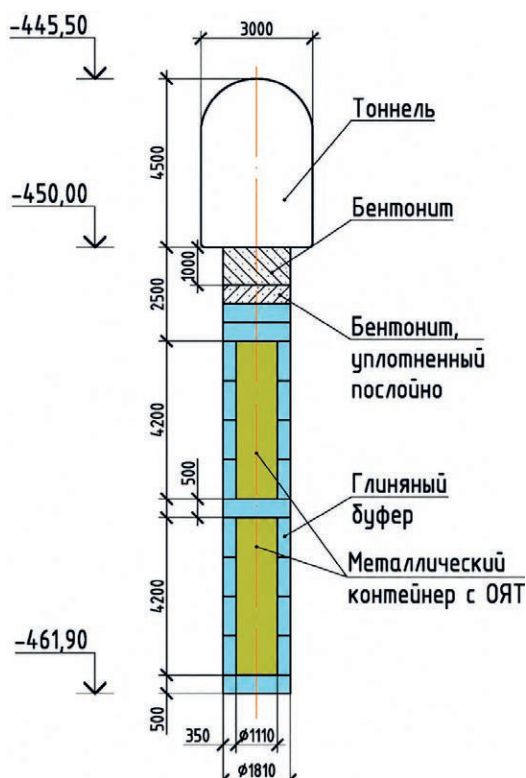


Рисунок 2. Концепция захоронения ОЯТ

Одиночные медные контейнеры размещаются в скважинах на дне туннелей, в горной породе на глубине 400 - 500 метров. Само же хранилище – это сеть туннелей для окончательного захоронения вокруг лаборатории.

Каждая вертикальная скважина заполнена бентонитом – глиной, которая служит буфером между окружающей породой и контейнером. Пропитавшись водой и разбухнув, бентонит должен ограничивать поступление грунтовых вод к контейнеру, проводить тепло, выделяемое отработавшим топливом в окружающую породу и поглощать радионуклиды в случае их выброса из контейнера. Будучи более пластичным, чем контейнер и вмещающая порода, бентонит защищает контейнер от небольших смещений горной породы.

Сами же породы, непосредственно прилегающие к скважине с контейнером, защищают его от неблагоприятных условий окружающей среды. Любой случайный выброс радионуклидов из контейнера локализуется горной породой. Туннели будут заполнены смесью щебня и бентонита, которая должна удерживать бентонитовую смесь после ее разбухания в скважинах и предохранять туннели от затопления грунтовыми водами. Заполнитель также защитит хранилище от несанкционированного вторжения.

ПЗРО-III (шахтного типа) состоит из двух основных комплексов: наземного и подземного. План всех уровней приведен на рисунке 3. Схема подземного комплекса ПЗРО-III показана на рисунке 4.

Площадь территории объекта составляет около 2 км². Концептуальным проектом предусматривается строительство следующих промышленных площадок и сооружений:

- промплощадка технологического ствола и закладочной скважины;
- промплощадка вспомогательного ствола;
- промплощадка вентиляционного ствола;
- площадка водопроводных сооружений;
- подъездных автомобильных дорог и инженерных сетей.

Площадки вспомогательного ствола и водопроводных сооружений предназначены для сооружения и обеспечения функционирования подземных выработок.

Основной площадкой ПЗРО-III является площадка технологического ствола и закладочной скважины (рисунок 5). Ее площадь составляет около 3,8 га. Ориентировочный объем выемки под площадку составит примерно 100 тыс. м³. Объемы проходки технологического ствола – приблизительно 14500 м³. Объемы проходки ствола закладочной скважины – приблизительно 2400 м³. Объемы проходки туннелей до ПЗРО – приблизительно 24000 м³.

**КОНЦЕПЦИЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РЕАКТОРА БН-350
В ГЛУБОКИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ**

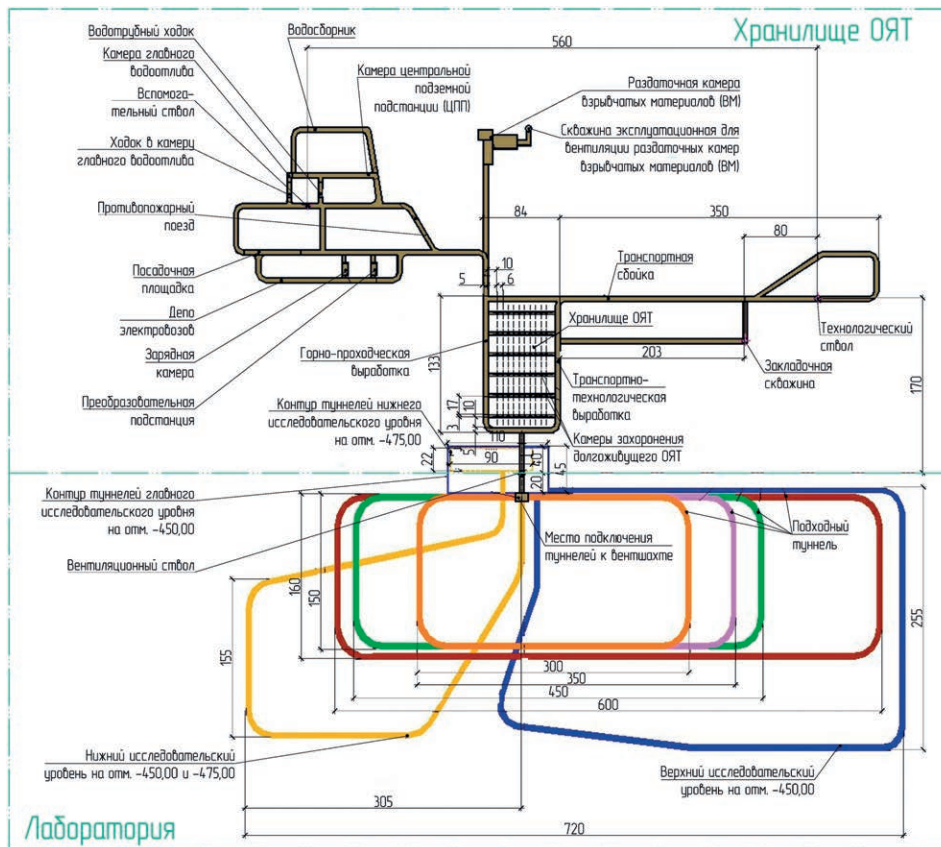


Рисунок 3. План-схема хранилища с подземной лабораторией

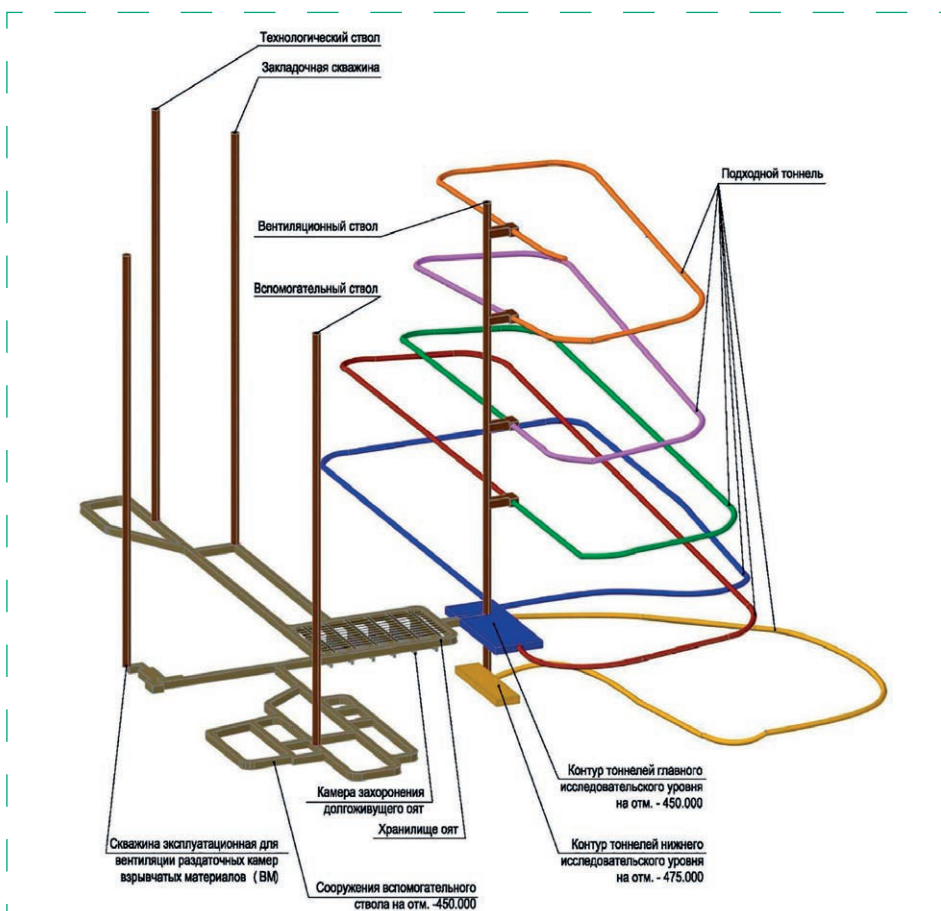
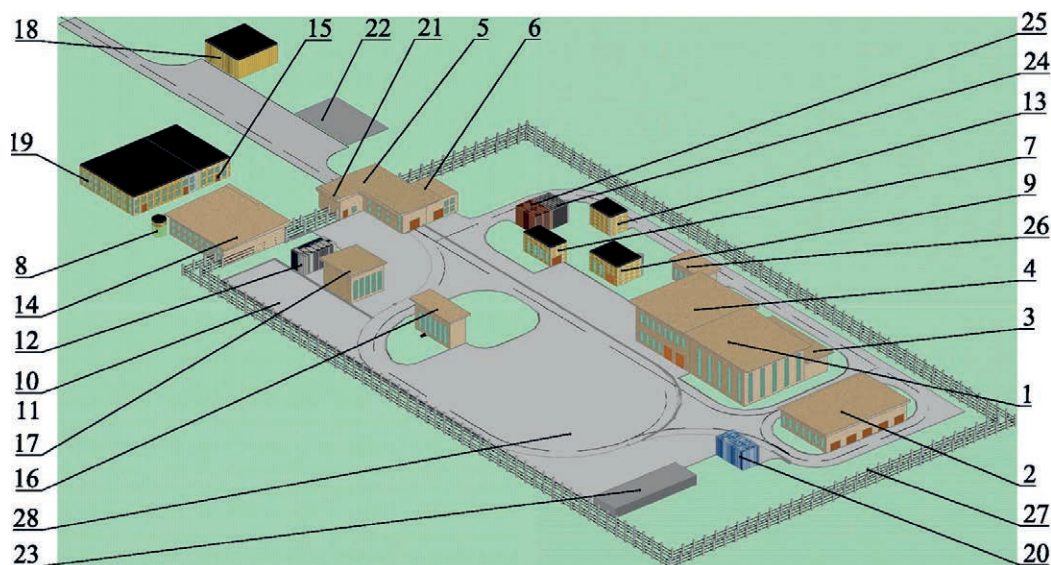


Рисунок 4. Схема ПЗРО-III с подземной лабораторией

КОНЦЕПЦИЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РЕАКТОРА БН-350 В ГЛУБОКИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ



- 1 – надшахтное здание вспомогательного ствола; 2 – здание подъемной машины; 3 – здание калориферной;
4 – завод по капсулированию; 5 – пункт дезактивации автотранспорта; 6 – здание хранения и подготовки реагентов;
7 – очистка контейнеров, загрязненных спецвеществами; 8 – канализационная насосная станция бытовых стоков;
9 – резервуар и насосная станция дождевых стоков; 10 – комплекс приготовления сухой закладочной смеси;
11 – открытая складская площадка; 12 – комплектная трансформаторная подстанция;
13 – тепловой пункт; 14 – санпропускник; 15 – лабораторный корпус; 16 – надшахтное здание закладочной скважины;
17 – здание подъемной машины; 18 – топливозаправочная станция комплексной поставки с блоком хранения топлива;
19 – административный корпус; 20 – закрытое ЗРУ - 6 кВ; 21 – контрольно-пропускной пункт (локальный) со смотровой площадкой; 22 – стоянка автотранспорта; 23 – противорадиационное укрытие;
24 – установка кондиционирования и очистки жидких радиоактивных отходов; 25 – модульная установка цементирования;
26 – установка очистки и обеззараживания шахтных вод; 27 – система физической защиты;
28 – зона разворота трейлера

Рисунок 5. Площадка технологического ствола и закладочной скважины

Концепция окончательной изоляции ОЯТ реактора БН-350 основана на сочетании применения искусственных и естественных барьеров. К искусственным барьерам относятся кондиционирование матрицы, упаковочные и буферные материалы. Естественным барьером служит глубокая геологическая формация. Ее свойства предполагается исследовать с помощью сопряженной подземной лаборатории, расположенной на единой площадке с пунктом захоронения. Предлагаемый технологический цикл обращения с ОЯТ БН-350 предусматривает транспортировку топлива в контейнерах ТУК-123 по железной дороге с последующей перегрузкой и доставкой их на промплощадку технологического ствола. Для ОЯТ БН-350 на смежном заводе капсулирования предусматривается дистанционная перегрузка герметичных чехлов из УКХ-123 в финальные стальные или медные контейнеры. После герметизации контейнеры спускаются по технологическому стволу и размещаются в подземных туннелях. Финальное захоронение контейнеров осуществляется в вертикальных скважинах диаметром 1,8 м и глубиной 11,9 м. Безопасность процесса обеспечивается локализацией радиационно-опасных операций на пункте перегрузки, площадках техно-

гического и вентиляционного стволов, а также функционированием систем очистки жидких радиоактивных отходов, цементирования и обеззараживания шахтных вод.

Концепция захоронения в пункте захоронения скважинного типа

В качестве альтернативного варианта окончательного захоронения ОЯТ БН-350 рассмотрена концепция пункта захоронения скважинного типа. Она предусматривает использование вертикальных скважин, пробуренных с поверхности земли в скальном основании на глубину от 4 до 5 км. Схема захоронения ОЯТ в глубокой скважине показана на рисунке 6.

ОЯТ инкапсулируется в контейнерах небольшого диаметра с внешним диаметром 0,5 м и длиной в 5 м. Контейнеры для захоронения опускаются в отверстия и располагаются один над другим. Расположение происходит на глубине между 2 и 4 км. Диаметр отверстия – 1 м до 2 км вниз и 0,8 м там, где располагаются контейнеры.

Предпочтительной вмещающей породой является геологически стабильная кристаллическая «коренная» порода. Для нее характерна очень медленная

КОНЦЕПЦИЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РЕАКТОРА БН-350 В ГЛУБОКИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ

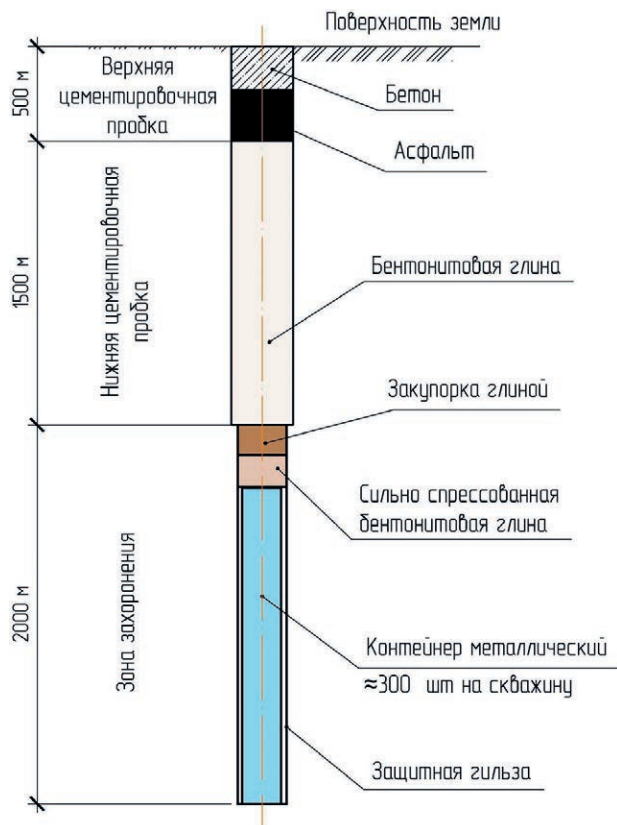


Рисунок 6. Схема концепции захоронения в глубокой скважине

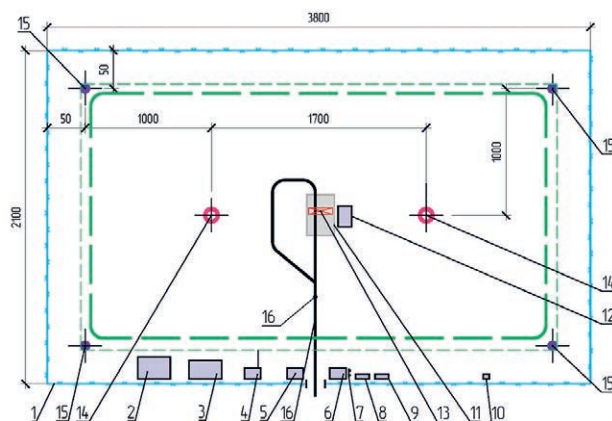
циркуляция подземных вод. Это может подтверждаться высокой соленостью воды и возрастом изотопов. По предлагаемой концепции, контейнеры окружаются глиняным буфером, а уплотненный бентонит помещается между контейнерами.

План-схема ПЗРО-С (скважинного типа) в глубокой скважине приведена на рисунке 7.

Для ОЯТ БН-350 скважинный вариант представляет интерес как альтернативная концепция окончательного захоронения. Вместе с тем его технологическая проработанность и накопленный опыт применения уступают шахтному варианту. Дополнительными сложностями являются проведение внутрискважинных исследований и обеспечение устойчивости стенок скважин в условиях горного и пластового давления. При бурении исследовательских скважин возникает необходимость отбора керна в больших объемах и проведения внутрискважинных геофизических исследований. Трудной задачей также является сохранение устойчивости горных пород на стенках ствола скважины в условиях проявления горного и пластового давлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены концептуальные подходы к окончательному захоронению ОЯТ реактора БН-350 в глубоких геологических формациях с учетом



Размеры приведены в метрах.

- 1 – ограждение с комплексом физической защиты;
- 2 – площадка комплекса видеонаблюдения и регистрации;
- 3 – ТП 35/10/0,4 кВ; 4 – комплекс горного мониторинга;
- 5 – КПП с вышкой наблюдения; 6 – санпропускник;
- 7 – щит пожарного инвентаря; 8 – бытовое здание;
- 9 – медпункт; 10 – уборная; 11 – площадка перегрузки ТУК (УКХ); 12 – здание упаковки чехлов с ОЯТ в контейнеры захоронения; 13 – кран козловой, 150 т; 14 – скважина захоронения (2 шт) $\varnothing 1000$ мм в интервале от 0 до минус 2000 м, $\varnothing 800$ мм в интервале от минус 2000 до минус 4000 м; 15 – исследовательская скважина (4 шт) диаметром от 150-450 мм глубиной до 5000 м;
- 16 – автомобильная дорога шириной 4,5 м

Рисунок 7. План-схема ПЗРО-С

особенностей его обращения и необходимости обеспечения долговременной изоляции радиоактивных материалов.

Для ОЯТ БН-350 рассмотрены два варианта размещения: в пункте захоронения шахтного типа и в глубоких скважинах. Для шахтного варианта разработана концептуальная схема, включающая подземную исследовательскую лабораторию, систему вертикального размещения контейнеров, инженерные и естественные барьеры, а также технологическую инфраструктуру для транспортирования и капсулирования ОЯТ.

Проведенное сравнение показало перспективность шахтного варианта для дальнейшей проработки применительно к ОЯТ БН-350. Его преимуществом является возможность комплексного сочетания подземной исследовательской лаборатории, системы туннелей и вертикальных скважин, а также организации последовательного технологического цикла от транспортирования и перегрузки ОЯТ до его окончательного размещения.

Скважинный вариант рассматривается как альтернативное решение. Его реализация связана с необходимостью решения дополнительных технических задач, включая проведение глубоких скважин, исследование массива горных пород и обеспечение устойчивости их стенок.

Таким образом, предложенная концепция ориентирована непосредственно на окончательное захоронение ОЯТ реактора БН-350. Представленные решения могут служить основой для дальнейших исследований и обоснования параметров будущего объекта захоронения ОЯТ БН-350.

Работа проводилась при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программы BR24993104 «Проведение исследований в обоснование выбора эффективных и оптимальных способов и технологий обращения с ОЯТ реакторной установки БН-350».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. International Atomic Energy Agency. Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. SSR-5. Vienna: IAEA, 2011. 62 p.
2. International Atomic Energy Agency. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. SSG-14. Vienna: IAEA, 2011. 104 p.
3. Birkholzer J.T., Houseworth J.E., Tsang C.-F. Geologic disposal of high-level radioactive waste: status, key issues, and trends // Annual Review of Environment and Resources. 2012. Vol. 37. P. 79–106. DOI: 10.1146/annurev-environ-090611-143314.
4. Ahn J., Apted M.J. Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. 778 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-100642-9.00001-3.
5. Gibb F.G., Beswick J., Travis K. Borehole disposal of spent fuel and other high-level wastes: the case for deep, vertical, fully cased holes in saturated “hard” rock // Frontiers in Nuclear Engineering. 2024. Vol. 3. Article 1470443. DOI: 10.3389/fnuen.2024.1470443.
6. Закон Республики Казахстан «Об использовании атомной энергии» от 12 января 2016 года № 442-V ЗРК (с изменениями и дополнениями).
7. Об утверждении Правил выбора площадки размещения ядерных установок и пунктов захоронения: постановление Правительства Республики Казахстан от 24 мая 2016 года № 301.
8. International Atomic Energy Agency. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. SSG-23. Vienna: IAEA, 2012. 120 p.
9. Norris S. Multiple roles of clays in radioactive waste confinement – introduction // Geological Society, London, Special Publications. 2019. Vol. 482. DOI: 10.1144/SP482-2019-4.
10. Lee J., Choi H., Lee C., Ji S., Cho D. Analyses on the thickness of the bentonite buffer in deep geological disposal for spent nuclear fuels // Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology. 2024. Vol. 22, No. 4. P. 491–501. DOI: 10.7733/jnfcwt.2024.039.
11. Han J., et al. Re-evaluation of the bentonite buffer dimension in a geological repository for spent nuclear fuel under the KURT conditions // Progress in Nuclear Energy. 2022. Vol. 145. Article 104138. DOI: 10.1016/j.pnucene.2022.104138.
12. Wang J., Chen L., Su R., Zhao X. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: planning, site selection, site characterization and in situ tests // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10, No. 3. P. 411–435. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002.
13. Koyanbayev Ye.T., Skakov M.K., Ganovichev D.A., Martynenko Ye.A., Sitnikov A.A. Simulation of the Thermal Conditions of Cask with Fuel Assemblies of BN-350 Reactor for Dry Storage // Science and Technology of Nuclear Installations. 2019. Article 3045897. 5 p. DOI: 10.1155/2019/3045897.

БН-350 РЕАКТОРЫНЫҢ ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ЯДРОЛЫҚ ОТЫНЫН ТЕРЕҢ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ
ТҮЗІЛІМДЕРДЕ КӨМУ ТҰЖЫРЫМДАМАСЫ

Д. И. Абұлгазинова*, К. С. Садыков, Л. П. Дерябина, В. А. Поспелов, А. Г. Коровиков

ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: davydenko@nnc.kz*

Мақалада БН-350 реакторының пайдаланылған ядролық (ОЯТ) отынын көму мүмкіндігі бойынша тұжырымдамалық жобалық шешімдер қарастырылады. Шахталық көму пункттері мен қатты жыныстардағы терең ұңғымаларды қоса алғанда, ояту-без қайта өңдеусіз түпкілікті көму технологияларына талдау жасалды. Жерасты зертханасының тұжырымдамалық жобалық шешімдері, жерасты кешендерінің конструктивтік ерекшеліктері, ұңғыма жұмыстарын ұйымдастыру, инженерлік инфрақұрылым және ОЯТ бар контейнерлермен жұмыс істеудің Көліктік технологиялық схемалары қаралды. Жер үсті және жерасты құрылыстарының негізгі сипаттамалары, тау-кен жұмыстарының көлемі, шахта оқпандары мен технологиялық алаңдардың параметрлері ұсынылған. Инженерлік және геологиялық кедергілердің көп деңгейлі жүйесін қолдану ұзақ мерзімді радиациялық қауіпсіздікті және радионуклидтердің биосфераға көшу қаупін азайтуды қамтамасыз ететіні көрсетілген.

Түйін сөздер: пайдаланылған ядролық отын, БН 350, радиоактивті қалдықтарды көму пункті, терең геологиялық көму, жерасты зертханасы, терең ұңғымалар.

CONCEPT OF DISPOSAL OF WASTE NUCLEAR FUEL FROM THE BN-350 REACTOR IN DEEP
GEOLOGICAL FORMATIONS

D.I. Abulgazanova*, K.S. Sadykov, L.P. Deryabina, V.A. Pospelov, A.G. Korovikov

“Institute of Atomic Energy” Branch RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

**E-mail for contacts: davydenko@nnc.kz*

The article discusses conceptual design solutions for the disposal of spent nuclear fuel (SNF) from the BN-350 reactor. It analyzes technologies for the final disposal of SNF without processing, including mine disposal sites and deep wells in solid rocks. The article also examines conceptual design solutions for an underground laboratory, the design features of underground complexes, the organization of tunneling operations, engineering infrastructure, and transportation and processing schemes for containers containing SNF. The main characteristics of above-ground and underground structures, the volume of mining operations, and the parameters of mine shafts and technological sites are presented. It is shown that the use of a multi-level system of engineering and geological barriers ensures long-term radiation safety and minimizes the risk of radionuclide migration into the biosphere.

Keywords: Spent nuclear fuel, BN-350, radioactive waste disposal facility, deep geological disposal, underground laboratory, deep wells.