

Из трех основных составляющих — гелий, ксенон и криптон наибольший удельный выход имеет ксенон, затем гелий и криптон. Максимальный относительный выход (свыше 40%) имеет гелий, выход ксенона и криптона почти одинаков и для большинства исследованных твэлов не превышает 20%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троянов В.М., Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Скупов М.В. Перспективы использования нитридного топлива для быстрых реакторов с замкнутым топливным циклом. — Атомная энергия, 2014, т. 117, вып. 2, с. 69—75.
2. Rogozkin B., Stepenova N., Fedorov Yu. e.a. Results of irradiation of ($U_{0.55}Pu_{0.45}$)N and ($U_{0.4}Pu_{0.6}$) fuel in BOR-60 up to ~12 at.% burn-up. — J. Nucl. Mater., 2013, v. 440, p. 445—456.
3. Tanaka K., Maeda K., Katsuyama K. e.a. Fission gas release and swelling in uranium-plutonium mixed nitride fuels. — Ibid., 2004, v. 327, № 1, p. 77—87.
4. Storms E. An equation which describes fission gas release from UN reactor fuel. — Ibid., 1988, v. 158, p. 119—129.
5. Поролло С.И., Иванов С.Н., Мариненко Е.Е., Забудько Л.М. Анализ экспериментальных данных о газовыделении и распухании облученного в реакторе БР-10 моноснитридного уранового топлива. — Атомная энергия, 2016, т. 121, вып. 6, с. 326—332.

Поступила в Редакцию 27.08.20

УДК 621.039

ТЕХНОЛОГИИ ПРИВЕДЕНИЯ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПОЛИГОНА В БЕЗОПАСНОЕ СОСТОЯНИЕ

Горин Н.В., Красносельских М.В., Смирнов В.Г. (РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, г. Снежинск), Васильев А.П. (АО «НИКИЭТ», г. Москва), Андреюк А.Н., Буренков С.В. (РФЯЦ — ВНИИЭФ, г. Саров), Куценко В.М. (Госкорпорация «Росатом», г. Москва)
e-mail: n.gorin@vniitf.ru

Ядерные объекты, оставшиеся после распада СССР, были разносторонними, масштабными и экологически опасными, наиболее значимыми из них являлись озеро Карачай в России, Семипалатинский испытательный полигон в Казахстане и Чернобыльская АЭС на Украине [1, 2]. В настоящей статье рассмотрены технологии приведения полигона в безопасное состояние, обеспечивающие, главным образом, соблюдение режима нераспространения. Рассмотрены возврат в Россию из Казахстана топлива активных зон исследовательских реакторов (1995—1998 гг.), ликвидация доступа к отходам ядерной деятельности на Семипалатинском полигоне (1995—2012 гг.) и дезактивация площадки Опытное поле (с 2014 г.) [2—4]. Достигнутые результаты опубликованы только в Республике Казахстан. Показано, что в кооперации крупных научных центров России и Национального ядерного центра Казахстана совместно с государственными органами обеих стран был приведен в безопасное состояние крупный ядерный объект в Казахстане.

Вывоз высокообогащенного топлива исследовательских реакторов. На территории

Семипалатинского полигона расположены исследовательские реакторы ИГР, ИВГ.1 (ИВГ.1М) и ИРГИТ, активная зона которых была изготовлена в СССР. После присоединения в 1993 г. Казахстана как неядерного государства к Договору о нераспространении ядерного оружия началась подготовка реакторов к обязательной постановке под гарантии МАГАТЭ и следовало определиться со статусом ядерного материала. Для этого топливо реакторов Россией было передано казахстанской стороне и принято совместное решение о вывозе остальных ядерных материалов на предприятия Минатома России. В настоящее время совместными усилиями проводится снижение обогащения топлива реактора ИВГ.

В соответствии с межправительственным соглашением Россия в 1996 г. декларировала и взяла на себя обязательство вывезти высокообогащенный уран общей массой 182 кг (облученный и необлученный), находящийся в Институте атомной энергии НИЦ Республики Казахстан [2]. Облученный ядерный материал обычно перевозили железнодорожным транспортом в специальных вагонах и контейнерах. Экономичес-

кая ситуация в России и действовавшие в то время тарифы сделали железнодорожную перевозку очень дорогой.

ВНИИТФ, которому была поручена транспортировка ядерных материалов, принял решение осуществить ее автомобильным транспортом. Это значительно удешевило перевозку, позволило вывозить ядерные материалы из хранилища ИАЭ НЯЦ Республики Казахстан и доставлять непосредственно к месту назначения, исключить опасные этапы перегрузки на железнодорожных станциях. Автомобильная перевозка потребовала разработки организационных и технических мероприятий по обеспечению безопасности на всех этапах перемещения ядерного материала — от разделки и загрузки в специальные пеналы и до размещения в хранилище в одном из российских НИИ. Участники работ выполнили следующее:

- выбрали сертифицированные контейнеры ТУК-19 и ТКС-18 для перевозки делящегося материала, обладающие достаточными защитными свойствами, что существенно сократило стоимость и продолжительность работ;

- обосновали ядерную и радиационную безопасность перевозки ядерного материала в штатных и аварийных ситуациях в выбранных контейнерах. На основании расчетов и заключений предприятием-разработчиком контейнеров (ВНИПИЭТ) была выдана разрешительная документация на право перевозки;

- выбрали, провели рекогносцировку и сдали в эксплуатацию автомобильный маршрут;

- оформили таможенные декларации на перевозимый груз;

- оформили документацию по взаимодействию российского воинского караула с органами власти Казахстана по маршруту движения, позволяющую выполнять боевую задачу по охране перевозимого груза;

- обосновали безопасность хранения и подготовили хранилища к приему ядерных материалов;

- разделали и упаковали ядерный материал в пеналы;

- перевезли (октябрь 1996 г.—май 1998 г.) ядерные материалы пятью автомобильными рейсами под охраной российского воинского караула.

Все работы по организации и транспортировке ядерных материалов проводили российские и казахстанские предприятия под руководством Минатома России с российской и Агентства по атомной энергии с казахстанской стороны.

Исключение доступа к отходам ядерной деятельности Семипалатинского испытательного полигона. Полигон был закрыт в августе 1991 г. В последующие годы была ликвидирована инфраструктура ядерных испытаний, в частности, стало невозможным использовать испытательные площадки, штольни и скважины по их первоначальному назначению. При закрытии испытательных площадок масштабных работ по защите чувствительной информации и отходов ядерной деятельности не проводилось. Штольни горного массива Дегелен закрывали по соглашению между Департаментом обороны США и Министерством науки и новых технологий Республики Казахстан о ликвидации инфраструктуры ядерных испытаний (3.10.1995). Закрытие сводили к осмотру их состояния, возведению бетонной защиты и обрушению припортальной части или просто обрушению на длину 15—20 м, что по первоначальному замыслу должно было сделать их непригодными к дальнейшему использованию и исключить несанкционированный доступ [2]. На площадках и внутри штолен были оставлены отходы ядерной деятельности и некоторые конструкции, которые содержали чувствительную информацию.

Принятые меры защиты оказались недостаточными, были обнаружены многочисленные несанкционированные попытки проникновения к объектам испытаний на площадках и в штольни. Цель проникновения — вынос цветного (кабели) и черного (рельсы и элементы конструкций) металла. При этом лица, занимавшиеся противоправной деятельностью, пренебрегали правилами безопасности, загрязняли дневную поверхность и, что самое опасное, могли получить доступ не только к чувствительной информации, но и к отходам, создав тем самым угрозу режиму нераспространения. Для противодействия этому в течение последующих лет создали дополнительные защитные барьеры, препятствующие несанкционированному доступу к отходам и чувствительной информации.

Работы проводились в соответствии с соглашением между правительствами России и Казахстана «О контейнерах «Колба» и специальном технологическом оборудовании, находящемся на территории СИП» от 28.03.1997. Были предложены, спроектированы, согласованы, утверждены и реализованы меры исключения доступа к ядерным материалам. Сферы деятельности были распределены следующим образом:

федеральные центры на основании анализа архивных материалов предоставляли исходную информацию для разработки проекта усиления защитных сооружений и осуществляли инженерно-консультативную поддержку при его реализации;

НЯЦ Республики Казахстан разрабатывал проект в соответствии с законодательством, затем проводил полевые работы по усилению защиты объектов;

начиная с 2000 г. к работам по дополнительной защите инженерных сооружений и исключению доступа к отходам ядерной деятельности подключилась американская сторона в части финансирования и контроля выполнения совместных работ.

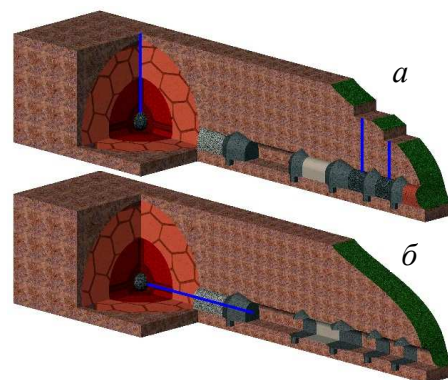
Первоочередные работы были направлены на уничтожение чувствительной информации и исключение доступа к отходам в скважинах на относительно небольшой глубине. Для предотвращения доступа к отходам скважины были накрыты мощными железобетонными колпаками, некоторые из них дополнительно окружены железобетонными колоннами по всей глубине, так что для их несанкционированного преодоления потребовались бы строительные работы, масштаб которых должен быть соизмерим с их изготовлением. Такие работы незамедлительно были бы обнаружены и пресечены.

Для защиты штолен горного массива Дегелен силами федеральных ядерных центров совместно с Госкорпорацией «Росатом» были разработаны количественные и качественные критерии оценки их состояния. Они позволили классифицировать штольни по степени опасности распространения и уязвимости выполнения Договора о нераспространении ядерного оружия. На их основании были выбраны объекты, для которых несанкционированный доступ злоумышленников к отходам при игнорировании

правил безопасности был бы связан с минимальными трудозатратами и сроками.

Главная цель полевых работ заключалась в создании дополнительных барьеров защиты, которые вместе с существующими защитными барьерами гарантировали невозможность несанкционированного доступа в полости штолен. Работы выполнялись в следующей последовательности: бурение скважин в полость штольни, отбор пробы с ее поверхности для подтверждения методами гамма-спектрометрии отходов ядерной деятельности и заполнение полости цементно-песчаным раствором с добавлением магнетита (Fe_2O_3), который не только обеспечивал физическую защиту, но и химически связывал отходы. После заполнения полости и создания дополнительных барьеров физической защиты штольня становилась безопасной. Действительно, злоумышленнику даже с учетом использования тяжелой строительной техники невозможно было получить доступ к отходам и вынести радиоактивное загрязнение на дневную поверхность.

Работы выполнялись двумя принципиально разными способами [4]. Если глубина залегания полости с отходами была невелика, рельеф местности над ней позволял установить оборудование, то бурили скважину с дневной поверхности в полость с отходами, по скважине опускали видеокамеру для подтверждения попадания в искомую полость (см. рисунок, *а*). Для окончательного подтверждения наличия отходов в полости через пробуренную скважину отбирали пробы с ее поверхности и совместно с представителями Агентства по уменьшению угроз США (DTRA) проводили верификационные гамма-спектрометрические измерения, по-



Схемы доступа в полости с отходами ядерной деятельности при вертикальном (*а*) и горизонтальном бурении (*б*)

сле чего принималось совместное решение о заполнении полости связующим материалом.

На начальном этапе работ (2008 г.) такую технологию применяли, начиная с глубины залегания полости 30—35 м, на заключительных этапах (2011—2012 гг.) была отработана технология попадания до глубины ~80 м. Если глубина залегания полости была большой (>100 м) или рельеф местности над ней не позволял установить оборудование, то вскрывали портал штольни, последовательно преодолевали все защитные барьеры и бурили скважину в полость (см. рисунок, б). Через пробуренную скважину с помощью видеокамеры осматривали полость, отбирали пробы с поверхности, проводили верификационные гамма-спектрометрические измерения на наличие следов ядерных отходов. Затем полость заполняли связующим материалом. После этого восстанавливали элементы забивки штольни, закрывали портал и маскировали территорию под естественный ландшафт.

Предпочтительной была первая технология бурения в полость с дневной поверхности как более безопасная и менее затратная.

Основные результаты совместных работ следующие:

исключен несанкционированный доступ к отходам ядерной деятельности и чувствительной информации на испытательных площадках и штольнях полигона [5];

созданы дополнительные бетонные и железобетонные защитные барьеры на 47 объектах, в том числе штольнях горного массива Дегелен. Полости, содержащие отходы, заполнены связующим материалом — цементно-песчаным и магнетитовым раствором;

получен опыт международного сотрудничества в области чувствительных технологий и конфиденциальной информации.

Очистка территории площадки Опытное поле. Ядерное оружие испытывали как в штольнях горного массива Дегелен и скважинах площадки Балапан, так и при наземных и воздушных взрывах на площадке Опытное поле. При подземных испытаниях все отходы остались под землей, на площадке они остались распределенными по поверхностному слою.

В 2012—2015 гг. были проведены радиационное обследование площадки Опытное поле и

прилегающей к ней территории посредством пешеходной гамма-спектрометрической съемки по профилям с разным расстоянием между ними, анализ проб грунта на содержание ядерных материалов как с поверхности, так и с разной глубины. В результате были обнаружены и окартены участки с повышенной концентрацией отходов, оценена масса отходов и предложены рекомендации по обращению. Было показано, что на большинстве обследованных участков основная часть ядерных отходов (до 95%) сосредоточена в верхнем 10-сантиметровом слое грунта [2]. Эти участки представляли опасность прежде всего экологическую, поэтому был снят 10-см слой грунта, связан с бетоном и магнетитом и помещен на хранение в контролируемые условия под гарантии МАГАТЭ. Критерием выбора участков была концентрация ядерных отходов в почве под изъятие более 8 млн^{-1} , под перемешивание с чистым грунтом (перепашивание на глубину 40—50 см) — более 1 млн^{-1} .

Таким образом, Российская Федерация и Республика Казахстан при финансовой поддержке США обеспечили безопасность ядерных объектов СССР и ликвидировали угрозу режиму нераспространения ядерного оружия на Семипалатинском испытательном полигоне. Содержащие чувствительную информацию дорогостоящие части ядерного материала были возвращены в Россию.

Авторы благодарят казахстанских коллег за многолетнее сотрудничество на Семипалатинском полигоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Проблемы** ядерного наследия и пути их решения. В 3 т. М.: Энергопроаналитика, 2012, 2013, 2015.
2. **Назарбаев Н.А., Школьник В.С., Батырбеков Э.Г. и др.** Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по приведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние. В 3 т. Курчатов, РГП «Национальный ядерный центр РК», Министерство энергетики РК, 2016.
3. **Куценко В.М.** Нам есть чем гордиться. — Человек. Энергия. Атом, 2013, № 1(19), с. 14—23.
4. **Степанюк В.С.** Снятие угроз. — Там же, с. 24—31.
5. **Совместное** заявление президентов Республики Казахстан, Российской Федерации и Соединенных Штатов Америки относительно трехстороннего сотрудничества на бывшем Семипалатинском испытательном полигоне. — Там же, с. 6—7.

Поступила в Редакцию 21.08.20