

ДОРОФЕЕВ А.Н. , СЕМЕНОВЫХ С.В. , ГАЯЗОВ А.З. , ГУБЕНКОЛ.С.

ООО НПФ «Сосны», г. Дмитровград, Россия

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВНОВЬ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ, ПРЕДПОЛАГАЕМЫХ К ПРИМЕНЕНИЮ НА БИЛИБИНСКОЙ АЭС ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТВС РУ ЭГП-6 К ДАЛЬНЕЙШЕМУ ОБРАЩЕНИЮ

В докладе рассматриваются основные подходы и методы, использованные при обосновании ядерной и радиационной безопасности технологии и оборудования, предполагаемых к применению на Билибинской АЭС при подготовке ОТВС РУ ЭГП-6 к дальнейшему обращению (захоронению или вывозу на переработку).

В связи с принятием решения о продлении сроков эксплуатации энергоблоков Билибинской АЭС до 2019 года проблема освобождения бассейнов выдержки от ОТВС стоит особенно остро. К сложностям решения данной задачи следует отнести отсутствие в проекте Билибинской АЭС технологической схемы, оборудования и транспортных средств, позволяющих обеспечить безопасное извлечение ОТВС из бассейнов выдержки (БВ) для подготовки к дальнейшему транспортированию за пределы АЭС.

Хранение ОТВС на Билибинской АЭС осуществляется в БВ, представляющих собой железобетонные емкости объемом 600 м³, облицованные листовой нержавеющей сталью. Сверху БВ перекрываются стальными плитами толщиной 400 мм с отверстиями диаметром 170 мм, расположенными в узлах квадратной сетки с шагом 220 мм. Отверстия в перекрытиях закрываются защитными стальными пробками.

Для размещения ОТВС РУ ЭГП-6, не имеющих признаков аварийности, в БВ-1 и БВ-2 использовались пеналы диаметром 108 мм и толщиной стенки 4 мм, изготовленные из углеродистой стали, покрытые каменноугольной эмалью ЭП81-20. Размещение ОТВС, не имеющих признаков аварийности, в БВ-3 осуществляется в пеналах 108, изготовленных из коррозионно-стойкой стали.

Для решения проблемы удаления ОЯТ с Билибинской АЭС специалистами ООО НПФ «Сосны» в 2011 году было предложено создание комплекса разделки и пеналирования (КРП) ОТВС РУ ЭГП-6.

Описание технологии и оборудования

В состав КРП входит стационарное оборудование, обеспечивающие и вспомогательные системы, инструменты, приспособления, технологическая оснастка, размещаемые на соответствующих участках КРП (рис. 1).

Участки КРП, предназначенные для обращения с ОТВС РУ ЭГП-6, размещаются в центральном зале (ЦЗ) и в помещении «Тепляк». Работы по обращению с твёрдыми радиоактивными отходами, образующимися при разделке ОТВС РУ ЭГП-6, производятся в транспортном коридоре и в хранилище слабоактивных материалов (ХСМ) Билибинской АЭС.

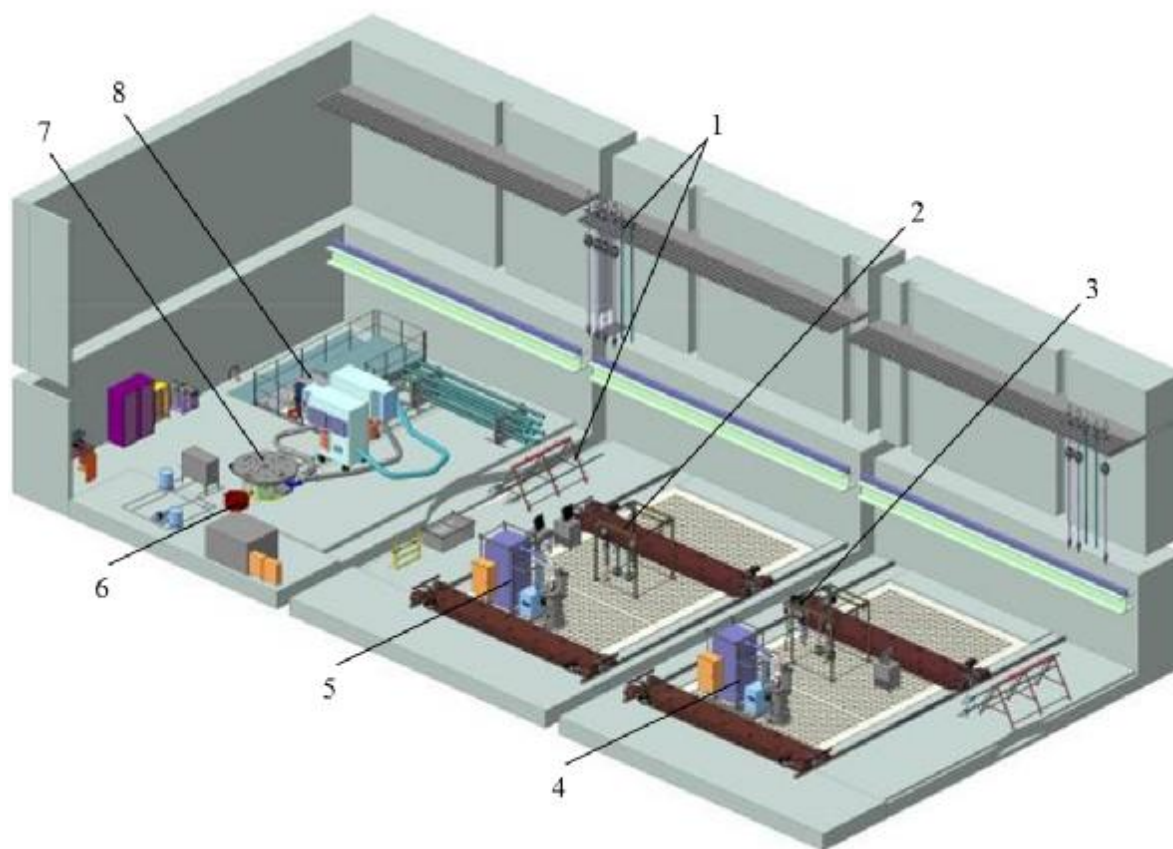


Рисунок 1. Размещение участков КРП в ЦЗ Билибинской АЭС

- 1 – стеллажи участка размещения инструмента; 2 – участок выгрузки БВ-1;
 3 – участок выгрузки БВ-2; 4 – участок инспекции БВ-2; 5 – участок инспекции БВ-1;
 6 – участок дезактивации; 7 – участок пеналирования;
 8 – участок обращения с ТРО в ЦЗ

Технология обращения с ОТВС РУ ЭГП-6 на Билибинской АЭС (рис. 2) предусматривает:

- извлечение из БВ ОТВС с пеналом с последующим завешиванием на верхней защитной плите (ВЗП) БВ;
- проверку прочности сварного соединения пенала с головкой ОТВС;
- определение наличия посторонних предметов в центральном канале ОТВС;
- контроль наличия воды во внутренней полости ОТВС и пенала;
- перемещение ОТВС с пеналом на участок пеналирования;
- установку пенала с ОТВС в подготовленный к загрузке пенал из коррозионно-стойкой стали;
- отрезку верхних конструктивных частей ОТВС дисковой фрезой выше графитовых втулок совместно с пеналом;
- приварку крышки к пеналу из коррозионно-стойкой стали;
- проверку герметичности сварного соединения крышки пенала с корпусом способом гелиевой (вакуумной) камеры.

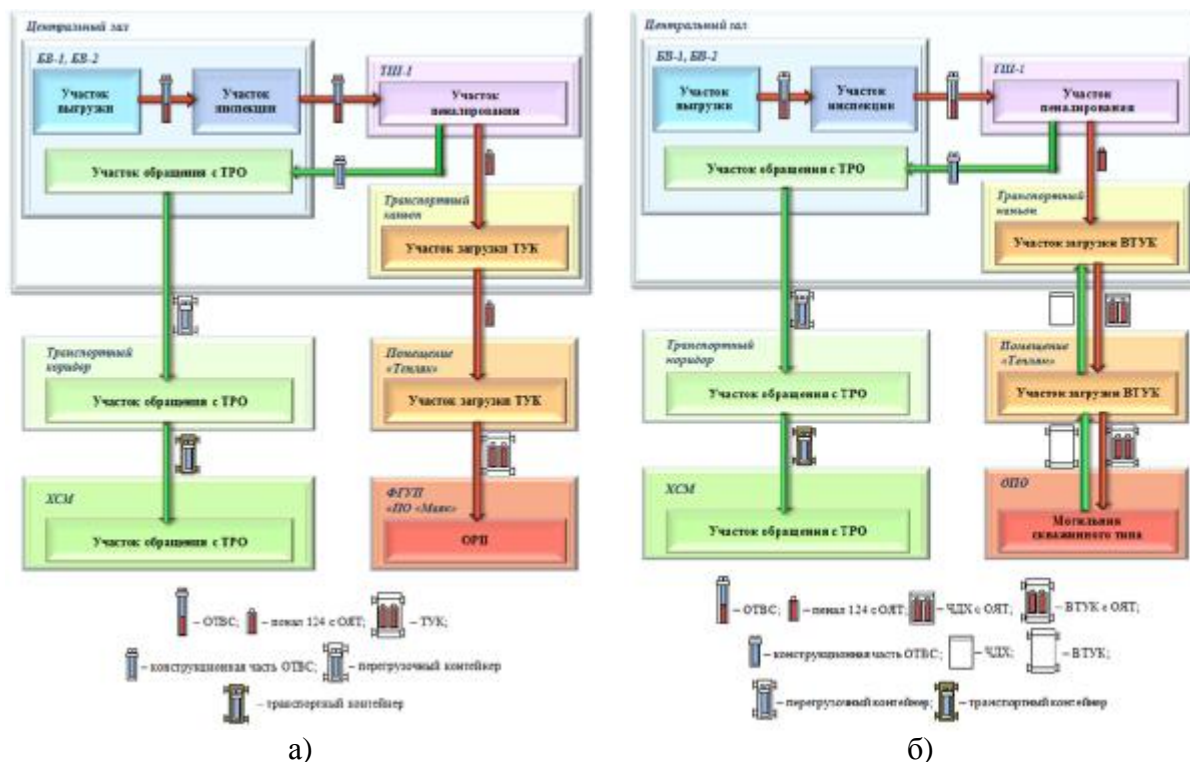


Рисунок 2. Варианты технологических схем обращения с ОТВС РУ ЭГП-6
 а) Принципиальная схема подготовки ОТВС к вывозу на переработку
 б) Принципиальная схема подготовки ОТВС к вывозу на захоронение

Все операции на участке пеналирования ОТВС выполняются в модуле автоматической разделки и капсулирования отработавшего ядерного топлива (МАРК ОЯТ), обеспечивающем необходимую защиту персонала от внешнего облучения и оборудованным вытяжной вентиляционной системой.

Загрузка пеналов с ОТВС в ТУК для дальнейшего вывоза на переработку осуществляется на участке загрузки, размещённом в транспортном каньоне адаптированного сооружения «Тепляк». Технология загрузки пеналов с ОТВС в ТУК предусматривает:

- подготовку ТУК к загрузке пеналов;
- перемещение пенала с ОТВС из МАРК ОЯТ участка пеналирования на тележку транспортного каньона участка загрузки;
- перемещение пенала с ОТВС по транспортному каньону в адаптированное сооружение «Тепляк»;
- загрузку пенала в ТУК;
- подготовку ТУК к дальнейшему обращению (временному хранению/транспортированию).

Загрузка пеналов с ОТВС в чехлы длительного хранения (ЧДХ) для дальнейшего захоронения осуществляется в тех же помещениях, что и загрузка пеналов с ОТВС в ТУК. Технология загрузки пеналов с ОТВС в ЧДХ и последующая загрузка чехла во ВТУК включает в себя:

- подготовку ЧДХ к загрузке пеналов;
- перемещение пенала с ОТВС из МАРК ОЯТ и загрузка в ЧДХ;

- перемещение загруженного ЧДХ в транспортном каньоне под модуль установки крышки;
- установка крышки на ЧДХ;
- перемещение ЧДХ с установленной крышкой в транспортном каньоне под технологический модуль;
- герметизация ЧДХ с помощью сварки; контроль герметичности сварного соединения;
- перемещение ЧДХ в транспортном каньоне под устройство грузозачное;
- загрузка ЧДХ во ВТУК;
- подготовка ВТУК к транспортированию.

В соответствии с разрабатываемой технологией расчётные темпы выполнения работ составляют 672 пенала с ОТВС в год.

Для проведения работ по разделке пеналов с ОТВС на топливную и конструкционную составляющие используется более 188 единиц оборудования.

Обоснование радиационной безопасности

Основными источниками радиационного воздействия на персонал при производстве работ по обращению с ОТВС РУ ЭГП-6 являются:

- ОТВС, находящиеся в БВ, при их транспортировании к месту разделки и в местах разделки (оборудование КРП) – источники внешнего гамма- и нейтронного излучения;
- продукты разделки ОТВС (топливная часть, отделенная конструкционная часть, ТРО) при обращении с ними на различных участках КРП, включая размещение их в пеналы, ТУК, ВТУК – источники внешнего гамма- и нейтронного излучения;
- аэрозоли, потенциально присутствующие в пеналах с ОТВС в результате коррозии ОЯТ в процессе хранения ОТВС в пеналах – источники внутреннего облучения;
- аэрозоли, поступающие в газовую среду оборудования МАРК ОЯТ в процессе реза пеналов с ОТВС по конструкционной части ОТВС – источники внутреннего облучения;
- поверхности оборудования и помещений, загрязненные радиоактивными веществами – источники внешнего гамма-излучения и внутреннего облучения (за счет дефляции аэрозолей);
- ОЯТ в пеналах при транспортировании – источник внешнего гамма- и нейтронного излучения;
- упаковки с ТРО – источник внешнего гамма-излучения.

С целью получения исходных данных о содержании радионуклидов в ОТВС РУ ЭГП-6, необходимых для обоснования безопасности разрабатываемых технологий, были определены радиационные характеристики ОЯТ РУ ЭГП-6 [1].

Для расчета радионуклидного состава и радиационных характеристик использовался разработанный в ГНЦ РФ-ФЭИ комплексный расчетный код «Ядерный калькулятор ЭГП-6» («ЯК ЭГП-6»), предназначенный для оперативного инженерного расчета радионуклидного состава и радиационных характеристик ОТВС, выгруженных из четырех энергоблоков ЭГП-6 Билибинской АЭС, после заданного периода выдержки.

Для получения данных о текущей дозиметрической обстановке в помещениях, задействованных в рассматриваемом технологическом процессе, в 2010 году было выполнено комплексное инженерное и радиационное обследование (КИРО) помещений Билибинской АЭС [2].

На основе данных о конструктивных особенностях (толщина стенок, материальное исполнение) оборудования, задействованного в технологическом процессе, были построены модели и проведены расчеты мощностей доз на рабочих местах персонала при производстве работ в КРП.

Полученная в результате расчетов информация о дозиметрической обстановке на рабочих местах персонала применялась при расчете доз внешнего облучения персонала. Учитывая неопределенность в значениях МЭД фонового излучения в местах размещения участков КРП на момент реализации данной технологии, расчет доз персонал выполнялся для различных величин мощностей доз фонового излучения из диапазона от 0 до 30 мкЗв/ч. Проведенные расчеты показали, что при максимально возможном уровне фонового излучения максимальная индивидуальная доза внешнего гамма-излучения не превысит 10 мЗв в год.

По результатам анализа технологического процесса обращения с ОТВС РУ ЭГП-6 в КРП было установлено, что основную опасность с точки зрения выхода радиоактивных веществ в воздух рабочей зоны представляют две операции:

- проверка содержания воды в пеналах с ОТВС на участке инспекции;
- рез пеналов по конструкционной части ОТВС на участке пеналирования.

Значения активности радиоактивных веществ, поступающих в вентиляционную систему при выполнении указанных технологических операций, были рассчитаны на основе экспериментальных данных о скорости деградации данного типа топлива во влажных средах [3] и относительной скорости выхода РВ из деградировавшего ОЯТ. По результатам расчетов установлено, что при интенсивности разделки 672 ОТВС/год годовой выброс составит $5,83 \cdot 10^8$ Бк или 29% от величины допустимого годового выброса ^{137}Cs для Билибинской АЭС (2 ГБк).

На основе данных о максимальных годовых выбросах РВ в окружающую среду были рассчитаны дозы внутреннего облучения, а также дозы внешнего облучения населения, обусловленные поверхностным радиоактивным загрязнением. При выполнении указанных расчетов использова-

лись значения приземных концентраций радионуклидов, рассчитанных в рамках работы [4].

Полученные значения эффективных доз облучения населения свидетельствуют о том, что при соблюдении режима очистки воздуха (коэффициент очистки $K=10^4$) радиационная безопасность населения обеспечивается даже при условии рассмотренного консервативного выхода аэрозолей из всех 672 разделяемых в течение года пеналов с ОТВС. Максимальная годовая эффективная доза населения в этом случае составит 39,9 мкЗв/год.

Обоснование ядерной безопасности

Особенностью данной технологии является применение оборудования, исключающего нахождение более чем одной ОТВС на каждом из участков (за исключением участка загрузки пеналов с ОТВС во ВТУК), что позволяет обеспечить необходимый уровень подкритичности на протяжении всего технологического процесса. Кроме того, выполнение операций по отрезке верхней конструкционной части ОТВС выполняется гарантированно выше верхних заглушек твэлов, что позволяет исключить выход элементов топливной композиции в объем технологического оборудования и упаковок с ОЯТ.

Для подтверждения непревышения критериев обеспечения ядерной безопасности была выполнена серия расчетов подкритичности размножающих сред упаковок с ОЯТ. При выполнении расчетов в обоснование ядерной безопасности рассматривались следующие упаковки, содержащие ЯДМ:

- пенал 108;
- пенал для фрагмента ОТВС;
- чехол длительного хранения.

Расчёт подкритичности данных размножающих сред проводили с помощью программы MCU-RFFI/A (аттестационный паспорт №61 от 17.10.96).

При построении расчетной модели рассматривали следующую загрузку упаковок ОТВС/фрагментами ОТВС с топливной композицией на основе:

- $UO_2 + Mg$ (обогащение по $^{235}U - 3,6 \%$);
- $OM9 + Mg$ (обогащение по $^{235}U - 3,3 \%$).

В связи с отсутствием информации о количестве воды, находящейся во внутренних полостях ОТВС и пенала 108, загружаемых в пенал для фрагмента ОТВС, при выполнении расчётов анализировали зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов от высоты водного столба в свободном объёме ОТВС и пенала 108.

Расчеты в обоснование ядерной безопасности пенала для фрагмента ОТВС и ЧДХ выполнялись в предположении отсутствия воды во внутренних полостях ОТВС и упаковок, что обеспечивается технологией производства работ.

Результаты расчётов подкритичности сред, проведенных для указанных выше упаковок, показал, что в режиме нормальной эксплуатации эффективный коэффициент размножения нейтронов не превысит:

- 0,1434 – для пенала 108 (полости пенала и ОТВС заполнены водой);
- 0,1188 – для пенала для фрагмента ОТВС;
- 0,1125 – для ЧДХ.

Анализ безопасности

В соответствии с приложением 1 [5], при выполнении анализа безопасности технологии подготовки ОТВС РУ ЭГП-6 к дальнейшему обращению рассматривались сценарии отклонений от нормальной эксплуатации оборудования, вызванные следующими исходными событиями:

1) внутренние исходные события:

- падение упаковок с ОТВС на различных участках обращения при выполнении транспортно-технологических операций;
- полное прекращение энергоснабжения оборудования, предназначенного для обращения с ОТВС РУ ЭГП-6, включая обеспечивающие и локализирующие системы безопасности;
- пожар в помещениях хранения и обращения с ОТВС РУ ЭГП-6 (включая центральный зал);

2) внешние исходные события:

- сейсмическое воздействие с интенсивностью, соответствующей проектному землетрясению;
- сейсмическое воздействие с интенсивностью, соответствующей МРЗ (запроектная авария);
- падение строительных конструкций или оборудования ЦЗ на участки КРП (запроектная авария).

При составлении перечня исходных событий основное внимание уделялось классу аварий, приводящих к потере одного или нескольких физических барьеров на пути распространения РВ в окружающую среду.

Анализ номенклатуры упаковок ОЯТ, используемых при производстве работ в КРП, и транспортно-технологической схемы перемещения упаковок в помещениях главного корпуса Билибинской АЭС показывает, что наиболее критичными с точки зрения влияния на ядерную и радиационную безопасность являются следующие исходные события:

- падение пенала 108 с ОТВС на дно БВ из точки с высотной координатой, соответствующей крайнему верхнему положению упаковки в захвате установки перегрузочной самоходной (УПС) (высота падения 11,3 м);
- падение пенала для фрагмента ОТВС на дно ТУК из точки с высотной координатой, соответствующей крайнему верхнему положению упаковки в захвате координатно-наводящего устройства (КНУ) (высота падения 7,5 м);

– падение ЧДХ на дно ВТУК из точки с высотной координатой, соответствующей крайнему верхнему положению упаковки в захвате устройства загрузочного (высота падения 7,5 м).

Падение пенала 108 с ОТВС на дно БВ не приведет к увеличению доз внешнего облучения персонала. Данное утверждение обусловлено локализацией источника ионизирующего излучения под верхней защитной плитой. Мероприятия по устранению последствий аварии будут выполняться с применением радиационно-защитного оборудования (шарниры ВЗП, защитные козырьки и т.д.), позволяющего минимизировать дозы внешнего облучения персонала при ликвидации последствий.

В связи отсутствием информации об изменениях прочностных характеристик пенала 108 и ОТВС, вызванных длительным хранением в БВ, при выполнении расчетов подкритичности предполагали полное разрушение ОТВС и пенала на дне БВ. Для минимизации утечки нейтронов с поверхностей рассматриваемой системы предполагали, что в результате падения на дне БВ образуется сферическая балк-форма. При этом элементы конструкционного и матричного материала ОТВС консервативно исключали из рассмотрения.

Из результатов расчетов следует, что максимальное значение $K_{эфф}$ будет наблюдаться в гомогенной смеси топливной композиции на основе UO_2 (с обогащением 3,6 % по ^{235}U) водой объемом 23,8 л. При этом рассматриваемая система будет оставаться в состоянии глубокой подкритичности ($K_{эфф} < 0,83$).

Падение пенала для фрагмента ОТВС/ЧДХ на дно ТУК/ВТУК не приводит к потере герметичности упаковки (что подтверждается расчетами на прочность), следовательно, поступления РВ в вытяжную вентиляционную систему и окружающую среду не произойдет.

Превышение доз внешнего облучения персонала также не будет наблюдаться, поскольку упавший пенал/ЧДХ оказывается локализованным во внутреннем объеме ТУК/ВТУК или транспортном каньоне. Мероприятия по ликвидации последствий будут выполняться с помощью длинномерных инструментов, конструкция которых обеспечивает защиту персонала от внешнего излучения.

Предполагаемое разрушение фрагмента ОТВС в пенале/ЧДХ и локализация ЯДМ в нижней части упаковки в результате падения в незагруженный ТУК/ВТУК не приводит к превышению принятых критериев обеспечения ядерной безопасности. Данное утверждение подтверждается результатами расчетов, обосновывающими отсутствие критической массы ЯДМ в ОЯТ единичной ОТВС, а также расчетами подкритичности при разрушении семи ОТВС во внутреннем объеме чехловых труб ЧДХ ($K_{эфф} < 0,47$).

Значимое влияние на уровень безопасности оказывает прекращение энергоснабжения вытяжной вентиляции БВ передаточного коридора и вы-

тяжных вентиляционных установок участков инспекции и пеналирования ОТВС.

Останов вентиляционных установок на каждом из участков не оказывает значимого влияния на радиационную безопасность персонала и населения, поскольку все источники излучения, с которыми осуществляется обращение на участках, являются закрытыми, за исключением МАРК ОЯТ, где предусматривается 100%-ное резервирование вентустановок и источников электроснабжения.

Вновь проектируемое оборудование КРП создается с учетом требований по сейсмостойкости конструкций. Оборудование участков КРП, отказы которого приводят к потере физических барьеров на пути распространения ИИ и РВ, проектировалось с учетом требований, предъявляемых к оборудованию категории сейсмостойкости II [6], что обеспечивает их работоспособность при прохождении проектного землетрясения.

Таким образом, в результате прохождения проектного землетрясения физические барьеры на пути распространения ИИ и РВ сохраняют свою работоспособность. Максимальные последствия аварии будут обусловлены остановом технологического процесса, что совпадает с последствиями полного прекращения энергоснабжения оборудования КРП.

При прохождении землетрясения с интенсивностью, соответствующей МРЗ, возможно увеличение мощности дозы гамма-излучения в ЦЗ и помещении «Тепляк» за счет потери физических барьеров на пути распространения ИИ.

Поступление РВ в форме аэрозолей в помещения Билибинской АЭС будет обусловлено выходом аэрозолей из пеналов на участке инспекции (пеналирования) при одновременном отказе вытяжных вентиляционных систем. Максимальная активность аэрозолей, поступивших в ЦЗ, не будет превышать активности РВ, накопленных в воздушном объеме единичного пенала 108.

Учитывая вероятность МРЗ, равную 10^{-4} год⁻¹, и вышеприведенные расчеты, риск потенциального облучения населения при отсутствии системы очистки воздуха от аэрозолей не превысит $4,1 \cdot 10^{-2}$ мкЗв/год.

Основываясь на величине вероятности МРЗ 10^{-4} год⁻¹, риск потенциального облучения персонала, равный 4 мЗв в год [7], не будет превышен даже при получении персоналом дозы, равной 39 Зв.

Заключение

На основании выполненных расчетов сделан вывод об обеспечении ядерной и радиационной безопасности при проведении работ по освобождению бассейнов выдержки Билибинской АЭС.

По результатам проведенного обоснования безопасности был выпущен предварительный отчет по обоснованию безопасности вновь разрабатываемых технологий и оборудования, предполагаемых к применению на Билибинской АЭС при подготовке ОТВС РУ ЭГП-6 к дальнейшему обра-

щению (захоронению или вывозу на переработку). Данный документ был согласован с научным руководителем Билибинской АЭС – ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».

Библиографический список:

1. Радионуклидный состав ОЯТ и ТРО в ОТВС ЭГП-6 (БВ-1 и БВ-2) и характеристики источников излучения, необходимые для оценок радиационной безопасности: Отчет / ООО «Пролог». – Обнинск, 2011.
2. Карта дозовых нагрузок (полей) в помещениях БВ-1, БВ-2 и вокруг них. Техническая справка: ТС-229 / ООО НПФ «Сосны». – Дмитровград, 2010. – 33 с. – Инв.№ 22-00605.
3. Исследование скорости выхода радионуклидов в воздух из топлива при осушении ОТВС I –й очереди БАЭС. Отчет о НИР (заключительный): Ф-069/02 / ФГУП «ИРМ» – Заречный, 2005.
4. Отчёт по углубленной оценке безопасности: Отчет / ФГУП концерн «Росэнергоатом», филиал «Билибинская атомная электрическая станция» – М., 2002.
5. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии. НП-061-05 : утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 30.12.2005 : введ. 01.05.2006. – М., 2005. – 12 с.
6. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций : НП-031-01. – Взамен ПНАЭ Г-5-006-87 : утв. Госатомнадзором России 19.10.2001 № 9 : введ. 01.01.2002. – М., 2001. – 25 с.
7. Положение о прогнозировании индивидуальных радиационных рисков персонала и населения при нормальной эксплуатации и возможных авариях на объектах использования атомной энергии : утв. Ростехнадзором от 14.07.2010 № 605.

АМОСОВ С.В.¹, ЛЕЩЕНКО А.Ю.¹, ТЕПЛОВ В.Г.², ИЛЬИН П.А.²

¹ООО «НПФ «Сосны» - Дмитровград, Россия

²ОАО «ГНЦ НИИАР» - Дмитровград, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПОЖАРО-И ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ОЯТ РЕАКТОРОВ РБМК-1000

Приведены результаты экспериментального определения скорости накопления водорода в объеме герметичной ампулы, содержащей негерметичные твэлы ОТВС РБМК-1000. Результаты экспериментальных работ будут использованы при обосновании безопасности транспортирования и временного хранения в бассейне ФГУП «ПО «Маяк» некондиционного ОЯТ РБМК 1000 в герметичных ампулах без предварительной осушки.