DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-22-34 УДК 621.039.75

ПРИМЕНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОГО И РАСЧЕТНОГО МЕТОДОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ВОЗМОЖНЫХ НАРУШЕНИЙ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОБЪЕКТАХ ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАО

В. В. Сускин[1], М. Н. Савкин[1], С. С. Уткин[1], В. Ю. Коновалов[2], А. В. Понизов[3]

[1]Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

[2]ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», Москва

[3]ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2020 г.

Целью данной работы является оценка риска возникновения нарушений нормальной эксплуатации пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (ПГЗ ЖРО) и их возможных радиологических последствий на этапах эксплуатации и после его закрытия. Учтены требования действующих федеральных норм и правил и санитарных правил в отношении безопасного захоронения жидких радиоактивных отходов. Рассмотрены основные варианты развития процессов, явлений и факторов (включая аварии), которые могут привести к нарушениям нормальной эксплуатации ПГЗ ЖРО с радиационными последствиями. В качестве критических событий для полигона «Северный», выбранного в качестве примера такого объекта, в период подготовки и закачки отходов рассмотрена потеря герметичности технологических трубопроводов, приемных емкостей, насосов и другого оборудования по естественным причинам (вследствие коррозии и т. д.). Частота таких событий оценена методом аналогий, в котором прототипами выступают оценки повреждений трубопроводов на АЭС и представительная статистика отказов на нефтепроводах и коммунальных трубопроводах. Консервативное значение «удельной аварийности» — вероятности возникновения нарушений нормальной эксплуатации в период прокачки отходов на один километр трубопровода — составило $3 \cdot 10^{-4}$ год$^{-1}$·км$^{-1}$. Проведенными расчетами показано, что дополнительных дозовых воздействий на персонал, непосредственно не принимающий участия в выполнении ремонтных работ, и население при возникновении таких событий, с учетом принятых инженерно-технических мер по защите, не ожидается. Коллективная доза персонала, принимающего непосредственное участие при выполнении ремонтно-восстановительных работ, с учетом установленного регламента может достигать 0,28 чел.-Зв при утечке среднеактивных радиоактивных отходов в заглубленном коллекторе. Оценка тяжести последствий потенциально опасных процессов, явлений и факторов в долгосрочной перспективе производилась с использованием программного средства «ГЕОПОЛИС» (ПС «ГЕОПОЛИС») методом численного моделирования.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, жидкие радиоактивные отходы, регулирующие требования, комплексное обоснование безопасности, процессы, явления и факторы, внешние воздействия природного и техногенного происхождения, вероятностный анализ безопасности, потенциальное облучение, полигон «Северный», метод аналогий, ПС «ГЕОПОЛИС».*

Введение

Использование способа глубинной закачки для захоронения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) радиохимических производств имеет более чем 60-летнюю историю [1]. Основная эколого-гигиеническая идея — удаление из биосферы и среды обитания человека вредных отходов путем их длительной изоляции в подземных горизонтах-коллекторах — подвергалась проверке с позиций безопасности в период эксплуатации путем проведения институционального контроля. Можно выделить три аспекта такой проверки: соответствие отечественным регулирующим

требованиям (прежде всего федеральным нормам и правилам в области использования атомной энергии), учёт международных стандартов и рекомендаций, а также разработка расчетных кодов по оценке различных процессов, релевантных в отношении безопасности. Необходимость понимания последовательности действий при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) является ключевым фактором в успехе данной процедуры. Цель настоящей статьи заключается в кратком обзоре возможных методических подходов к оценке риска возникновения нарушений нормальной эксплуатации и их возможных радиологических последствий на этапах эксплуатации и после закрытия ПГЗ ЖРО.

В ряду особенностей, событий, процессов и явлений (ОСП), которые могут возникать на ПГЗ ЖРО, существуют критические ОСП для его нормальной эксплуатации, происходящие как на поверхности и затрагивающие наземные здания и сооружения, так и на глубине, непосредственно в горизонтах закачки. Данная работа направлена на анализ возможных ситуаций, связанных с «критическими» событиями, которые выходят за рамки режима нормальной эксплуатации ПГЗ ЖРО.

Пункт глубинного захоронения ЖРО полигон «Северный»

Применение различных методических подходов к учету потенциально опасных ОСП было рассмотрено на конкретном примере — ПГЗ ЖРО полигон «Северный» (далее также ПГЗ ЖРО), в настоящее время эксплуатируемый филиалом «Железногорский» ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами».

Эксплуатация полигона, где проводится закачка средне- (САО) и низкоактивных (НАО) ЖРО, началась в 1965 году [2]. Захоронение осуществляется путем контролируемой закачки ЖРО через систему нагнетательных скважин в два водоносных горизонта, характеризующихся застойным характером водообмена, изолированных от вышележащих водоносных горизонтов и поверхности земли водонепроницаемыми породами. Отходы поступают к нагнетательным скважинам по трубопроводам высокого давления. Управление работой нагнетательных скважин осуществляется путем изменения расхода и давления на устьевой задвижке. ПГЗ ЖРО оборудован системами разгрузочных (для снижения пластового давления; в настоящее время не используются) и наблюдательных скважин. Наблюдательные скважины используются для контроля содержания и распространения радионуклидов в поглощающих и вышележащих водоносных горизонтах.

Применение для оценки безопасности ПГЗ ЖРО методов вероятностного анализа безопасности заключалось в рассмотрении последствий возможных ОСП, характерных для площадки полигона «Северный». Все последствия исходных событий (нарушений нормальной эксплуатации), включая внешние, были сведены к пяти основным сценариям:

- разгерметизация трубопроводов и оборудования, приводящая к выходу ЖРО из технологических пространств на глубине 2,5—3,0 м и на поверхности земли;
- ускоренная горизонтальная миграция радионуклидов по зонам повышенной проницаемости, образование которых обуславливается изменением гидрогеологических условий полигона в результате протекания геологических процессов тектонического генезиса;
- вертикальная миграция радионуклидов по зонам повышенной проницаемости, образование которых обуславливается изменением гидрогеологических условий полигона в результате протекания геологических процессов тектонического генезиса в вышележащие горизонты;
- вертикальная миграция радионуклидов по затрубному пространству нагнетательных скважин в вышележащие горизонты;
- изменение водного баланса территории (увеличение и уменьшение инфильтрационного питания территории ПГЗ ЖРО; в данной статье не рассматривается).

Данные сценарии, по мнению авторов, наиболее полно характеризуют последствия всех вероятных критических событий: процессов, явлений и факторов, возможных на площадке полигона «Северный» и приводящих к радиационным последствиям.

Сценарии, связанные с разгерметизацией технологических трубопроводов, и их последствия исследовались с помощью метода аналогий, позволяющего получить оценку необходимых параметров для определения недостающих частот возникновения ряда ОСП в ходе эксплуатации. Для оценки радиологических последствий при реализации сценариев, связанных с изменениями геологических и гидрогеологических условий полигона, применялись расчетные коды, которые позволяют прогнозировать миграцию радионуклидов в геологической среде на протяжении всего периода их потенциальной опасности.

Метод аналогий

Метод аналогий использовался при оценке частоты нарушений нормальной эксплуатации, связанных с разгерметизацией трубопроводов, приемных емкостей, насосов и другого оборудования, в результате которых может возникать выход ЖРО за пределы технологических пространств. Применение этого метода возможно в тех случаях, когда статистика по нарушениям нормальной эксплуатации (включая аварии) на конкретном объекте (или для типа рассматриваемых объектов) недостаточна, а технология эксплуатации подобного оборудования не является уникальной.

Количественная характеристика частот и причин повреждений трубопроводов в предшествующий период эксплуатации ПГЗ ЖРО ограничена. Документация содержит лишь краткие упоминания того, что в период экспериментальных и опытных работ на ПГЗ ЖРО имели место случаи нарушений герметичности трубопроводов, течи узлов арматуры, задвижек и соединений, проливы загрязненных проб. Все эти инциденты не привели к загрязнению объектов за пределами I пояса санитарно-защитной зоны ПГЗ ЖРО и не создали предпосылок такого загрязнения в последующем. Для минимизации влияния такого рода явлений в период активной эксплуатации, в проектные решения было включено сооружение специальных лотков для размещения трубопроводов, предназначенных для локализации возможных протечек в специальных сборниках [3]. По современным нормативным подходам, такие системы (инженерно-технические мероприятия) относятся к локализующим системам безопасности, направленным на предотвращение перерастания нарушений нормальной эксплуатации (разгерметизация трубопроводов) в аварии с радиационными последствиями для персонала и населения. Как показывает опыт эксплуатации, принятые инженерно-технические мероприятия позволили снизить потенциальные радиационные последствия отказов оборудования ПГЗ ЖРО (трубопроводов, емкостей, насосов и запорной арматуры) до приемлемого уровня. Однако применение локализующих систем не исключает возникновения указанных событий, а лишь направлено на снижение их потенциальных последствий.

Вместе с тем реальная статистика таких событий для аналогичного оборудования в других отраслях промышленности существует и может быть применена для получения консервативных оценок частоты нарушения целостности трубопроводов (методом аналогий).

В качестве аналогов были использованы результаты оценок разрушения трубопроводов на АЭС, в нефтяной промышленности и коммунальном водоснабжении. Очевидно, что условия эксплуатации на вышеперечисленных промышленных и коммунальных объектах отличаются от условий эксплуатации трубопроводов на ПГЗ ЖРО (материал труб — нержавеющая сталь; только подземная прокладка ниже глубины сезонного промерзания и использование железобетонных лотков для сбора возможных протечек), однако механизмы и причины деградации, приводящие к нарушению герметичности трубопроводов, и частота повреждений могут иметь общую природу и схожие количественные характеристики.

Разгерметизация трубопроводов на АЭС

Для оценки частот повреждений трубопроводов на АЭС используются два подхода:

1) *анализ структурной надежности,* основанный на вероятностных оценках разрушений участка трубопровода методом Монте-Карло как функции времени, включая такие параметры, как частота проведения контроля и вероятность обнаружения дефекта [4, 5]. Программное обеспечение для реализации такой вероятностной модели достаточно сложное, а неопределенности оценок велики, так как для трубопроводов на АЭС частота отказов/разрушений недостаточна для верификации результатов вероятностного анализа безопасности [6];

2) *анализ эксплуатационных данных* за несколько тысяч реакторо-лет о вероятных причинах разгерметизации и малых течей трубопроводов.

Основные механизмы деградации, приводящие к нарушению герметичности трубопроводов, указаны на рис. 1 [7].

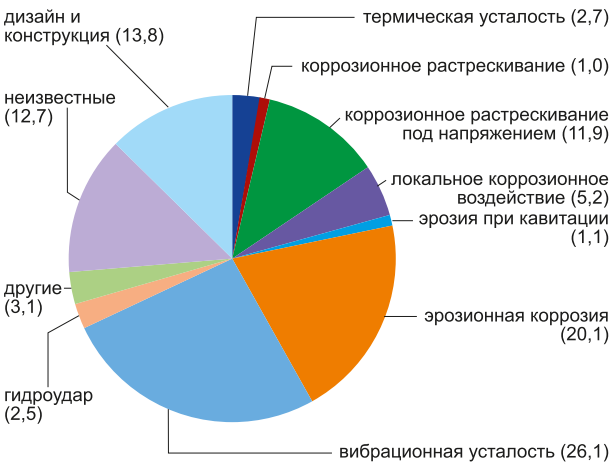

Рис. 1. Диаграмма отказов трубопроводов в процентном отношении от общего числа отказов (по данным эксплуатационного опыта США)

Из приведенных данных (рис. 1) следует, что около 60% повреждений трубопроводов [7] обусловлены коррозионным растрескиванием под напряжением, эрозионной коррозией и вибрационной усталостью. Часть повреждений, приводящих к протечкам выше допустимых значений, выявляются системой обнаружения протечек. Однако для дефектов трубопроводов, вызванных эрозионной коррозией, вибрационной усталостью и гидроударом и приводящих к разрыву, нет надежных оценок по скорости истечения.

В табл. 1 приведено разделение механизмов деградации по категориям для оценки потенциальных разрывов трубопроводов в рамках матрицы риска.

Таблица 1. Категории механизмов деградации при оценке потенциального риска для трубопроводов

Потенциальный риск разрыва для трубопроводов	Условия течи	Механизм деградации	Типичные величины частот, (реакторо-год)$^{-1}$
Высокий	Большая	Эрозионная коррозия, гидроудар, вибрационная усталость	~10^{-2}
Средний	Малая	Тепловая усталость, усталостная коррозия, коррозионное растрескивание под напряжением, локальная коррозия	⩽10^{-3}
Низкий	Отсутствует	Отсутствует	<10^{-4}

Для консервативной оценки частоты отказов/повреждений трубопроводов на единицу их длины можно воспользоваться сведениями о длине трубопроводов на ВВЭР-1000. Длина трубопроводов, включая 4 петли второго контура, составляет около 500 м. Предполагается, что для первого контура характерен высокий потенциальный уровень риска разрыва трубопровода, а для второго контура — средний. Данное предположение вытекает из того факта, что давление в первом контуре ВВЭР-1000 приблизительно в три раза выше, чем во втором [19]. В таком случае получим оценку частот отказов на 1 км длины трубопроводов около $4{\cdot}10^{-2}$ и $2{\cdot}10^{-3}$ год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$. Для условий эксплуатации трубопроводов на ПГЗ ЖРО более подходящей представляется оценка в 10^{-4}—$2{\cdot}10^{-3}$ год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$ в связи с отсутствием такого высокого давления и температуры, как на ВВЭР-1000. Этот диапазон величин может быть использован как интервал граничных значений вероятности разгерметизации трубопроводов, емкостей, насосов и другого оборудования при нормальной эксплуатации ПГЗ ЖРО. Превышение этого уровня (по данным технологического контроля за состоянием герметичности трубопроводов в наземной части полигона) следует трактовать как нарушение нормальной эксплуатации.

Разгерметизация нефтепроводов

На нефтепроводах ежегодно отмечается 50—60 тысяч случаев разгерметизации, свищей и пр. [12]. Высокие значения удельной аварийности характерны для внутрипромысловых трубопроводов. Верификация частоты нарушений нормальной эксплуатации была проведена на примере Ватьеганского месторождения, расположенного на территории Ханты-Мансийского АО [9]. В эксплуатации находится около 900 км трубопроводов различного назначения и диаметра: 30% — нефтесборные трубопроводы; 9,9% — напорные нефтепроводы от дожимной насосной станции до магистрального нефтепровода; 12,5% — внутриплощадочные нефтепроводы; 43% и 4,6% — высоконапорные и низконапорные водоводы соответственно. Более 45% трубопроводов находилось в эксплуатации свыше 10 лет.

Средние значения удельной аварийности, в зависимости от назначения трубопроводов, следующие:

- нефтесборные трубопроводы — 0,074 год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$;
- низконапорные водоводы — 0,084 год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$;
- напорные нефтепроводы — 0,026 год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$;
- высоконапорные водоводы — 0,017 год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$.

Высокие значения удельной аварийности нефтесборных трубопроводов и низконапорных водоводов во многом обусловлены режимами течения жидкости в них. Поскольку в трубопроводах данного назначения, как правило, низкие скорости течения, создаются условия для выноса из потока механических примесей с последующим их осаждением на стенках труб, что интенсифицирует коррозионные процессы.

Значения удельной аварийности в зависимости от диаметра нефтепроводов и водоводов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Удельная аварийность на промысловых трубопроводах Ватьеганского месторождения [9]

Диаметр, мм	Удельная аварийность, год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$	
	нефтепроводы	водоводы
114	0,012	0,010
159	0,103	–
168	0,038	0,012
219	0,049	0,030
273	0,054	0,034
325	0,045	–
426	0,024	0,250

Из табл. 2 следует, что наибольшая удельная аварийность наблюдается на нефтепроводах диаметром 159 мм. Отметим, что трубопроводы на ПГЗ ЖРО «Северный» имеют диаметры 102, 108, 156 мм. Следовательно, по аналогии с промысловыми нефтепроводами и водоводами удельная аварийность, приводящая к разрыву трубопроводов, для ПГЗ ЖРО может консервативно предполагаться равной около $1{\cdot}10^{-2}$ год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$.

Протяженность нефтепроводных магистральных трубопроводов в России составляет почти 50 тыс. км. Средняя норма сохранности трубопроводов — порядка 30 лет. Фактический возрастной состав действующих нефтепроводов в России: 38 % — свыше 30 лет, 37 % — от 20 до 30 лет и 25 % — менее 20 лет [9].

К авариям на магистральном нефтепроводе относят утечки нефти объемом 10 м^3 и более. Инцидентом считается отказ или повреждение оборудования или технических устройств, которые могут сопровождаться утечками нефти объемом менее 10 м^3 без воспламенения нефти или взрыва [18].

Частота аварий на магистральных трубопроводах в России, по данным многолетней статистики, составила в среднем $1{,}4{\cdot}10^{-4}$ год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$ [10].

Для магистральных нефтепроводов, по которым перекачивают подготовленную нефть, неагрессивную по отношению к металлу труб, наиболее важными характеристиками являются дефекты металла трубы и сварных швов.

В работах [10, 11] был проведен анализ риска аварий ряда нефтепроводных систем в России.

Среднее значение удельной частоты аварий составило $2{\cdot}10^{-4}$ год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$, что согласуется с вышеприведенной многолетней оценкой для России в целом.

Анализ аварийности трубопроводов Западной Европы за 25 лет был проведен Европейской организацией по защите окружающей среды Concawe (Conservation of Clean Air and Water in Europe) [12]. Всего было зафиксировано 340 отказов, из которых механическими причинами вызвано 28 %, коррозией — 30 %, нарушениями режима эксплуатации — 7 %, стихийными явлениями — 4 %. Самое большое число повреждений вызвано посторонним вмешательством — 112 аварий (33 % от суммарного числа отказов), в т. ч. 8 — как результат преднамеренных действий. Несмотря на значительное увеличение времени эксплуатации системы, частота аварий за 25-летний период сократилась с $1{,}2{\cdot}10^{-3}$ год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$ до $4{,}0{\cdot}10^{-4}$ год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$.

Американские аналитики консалтинговой фирмы EFA Technologies Inc. пришли примерно к таким же выводам. Факты постороннего вмешательства, к которым они относят и повреждения, вызванные стихией, составили 49 % аварий, коррозия — 32 %, нарушения режима эксплуатации — 3 % и остальные, то есть преимущественно механические, — 16 %. Оползни, землетрясения и флювиальные (речные) процессы являются природными явлениями, способными вызывать серьезные повреждения, вплоть до разрыва трубопровода по всей окружности трубы. Трубопроводы, проходящие под землей, намного менее подвержены коррозии и повреждению, чем надземные трубопроводы.

Исследования трубопроводов с различными толщинами стенок труб выявили, что с увеличением толщины стенок труб вероятность повреждения уменьшается (табл. 3).

Таблица 3. Зависимость частоты повреждений от толщины стенок трубопровода [12]

Толщина стенок труб, мм	Частота, год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$
0–5	$7{,}5{\cdot}10^{-4}$
5–10	$2{,}2{\cdot}10^{-4}$
10–15	$2{,}5{\cdot}10^{-5}$

Данные по частоте аварийных ситуаций на магистральных нефтепроводах большого диаметра (10^{-4}—10^{-3} год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$) и приведенные выше результаты многолетнего контроля частоты и причин аварий в различных странах мира, которые имеют большую статистику и хорошо согласуются между собой, рекомендуется использовать при вероятностном анализе безопасности (ВАБ-1) для ПГЗ ЖРО «Северный». С учетом наиболее консервативной оценки удельной аварийности на промысловых трубопроводах (10^{-2} год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$) и более щадящих условий эксплуатации трубопроводов из нержавеющей стали на ПГЗ ЖРО (имеется в виду меньшая нагрузка на трубопроводы при закачке), при проведении оценок значение вероятности нарушения нормальной эксплуатации трубопроводов в период прокачки ЖРО было принято равным $3{\cdot}10^{-4}$ год$^{-1}{\cdot}$км$^{-1}$. Данное значение как раз включает в себя «более щадящие» условия эксплуатации.

Разрывы трубопроводов коммунального водоснабжения

Методика определения потерь воды в системах коммунального водоснабжения [13] не позволяет рассчитывать частоту возникновения аварийных событий, но предлагает математический аппарат оценки неучтенных потерь воды из водопроводной сети, а также порядок расчета и нормы естественной убыли воды при транспортировке, хранении и передаче

абонентам. Норма естественной убыли — это предельно допустимая величина безвозвратных потерь воды, возникающих непосредственно при ее транспортировке и передаче абонентам вследствие сопровождающих их физических процессов. В норму естественной убыли включаются в том числе потери от просачивания воды при ее подаче по напорным трубопроводам, находящимся в исправном техническом состоянии.

Понятие «естественная убыль ЖРО при транспортировании по трубопроводу» отсутствует в регулирующих требованиях и эксплуатационной документации. Однако, если экстраполировать изложенный в методике определения неучтенных расходов и потерь воды в системах коммунального водоснабжения [13] подход к оценке «предельно допустимого» выхода ЖРО из трубопровода для сценария транспортирования 100 м^3 ЖРО по территории полигона «Северный» по стальному трубопроводу диаметром 159 мм, толщиной 6 мм и общей длиной около 10 км в течение одного часа, то оцениваемая условная величина протечек ЖРО, аккумулируемых системой лотков для сбора протечек, составит около 0,3 м^3. Это значение могло бы служить референтным показателем при мониторинге эксплуатационных характеристик передачи ЖРО на захоронение. Однако, согласно многолетнему опыту эксплуатации ПГЗ ЖРО, лотки успешно собирают минимальные протечки, которые снова поступают на захоронение, поэтому дебаланс ЖРО равен нулю.

Характерные повреждения в водопроводной сети, приводящие к неучтенным расходам и потерям воды, на которые приходится 95 % от всех аварий в системе подачи и распределения, включают: свищи (37,8 %), спаи (30,1 %), переломы (21,0 %) и трещины (6,2 %) [13]. Эти оценки могут быть полезны при оптимизации технологического контроля и диагностики состояния трубопроводов и оборудования на ПГЗ ЖРО.

Моделирование сценариев с помощью ПС «ГЕОПОЛИС»

В настоящее время многообразие вычислительных и расчетных кодов позволяет построить более точные, по сравнению с устаревшими двумерными, полноценно трехмерные модели ОИАЭ и оценить последствия аварийных ситуаций на этом объекте методами математического моделирования. Анализ последствий альтернативных сценариев эволюции ПГЗ ЖРО, перечисленных в начале статьи, проводился с помощью программного средства (ПС) «ГЕОПОЛИС» [14], включающего в себя созданную с помощью аттестованного расчетного кода GeRa (РК GeRa) трехмерную модель полигона «Северный».

Данное ПС использовалось для проведения численного моделирования распространения в геологической среде компонентов ЖРО и позиционируется как «постоянно действующая» геофильтрационная геомиграционная модель полигона, которая может быть использована для обоснования безопасности ПГЗ ЖРО на эксплуатационном и постэксплуатационном этапах, в том числе и с учетом альтернативных сценариев его эволюции [14].

В данной статье рассмотрены три альтернативных сценария: ускоренная горизонтальная и вертикальная миграция радионуклидов по зонам повышенной проницаемости, образование которых обуславливается изменением гидрогеологических условий полигона в результате протекания геологических процессов тектонического генезиса; вертикальная миграция радионуклидов по затрубному пространству нагнетательных скважин в вышележащие горизонты.

Сценарии вертикальной миграции были объединены в одну модель, так как имеют схожие условия для миграции радионуклидов, а именно — наличие вертикальных зон повышенной проницаемости, условно проходящих через все горизонты модели ПГЗ ЖРО.

Модель ПГЗ ЖРО представляет собой три выделенных основных водоносных горизонта (I, II и III) и разделяющие толщи (A, Б, F, B, Г и D). Слои залегают сверху вниз: D, III, Г, II, B, F, Б, I и A. Сверху весь осадочный чехол, представляющий собой сложное переслаивание песчаных и глинистых слоев, перекрыт четвертичными отложениями (Q). Закачка ЖРО производится во II и I эксплуатационные горизонты [1, 14].

Общий вид модели в плане представлен на рис. 2. Для моделирования сценариев вертикальной миграции в ПС «ГЕОПОЛИС» во всех слоях, начиная с I горизонта закачки и выше, были заданы условные проницаемые каналы, которые принимались единой зоной неоднородности. Горизонтальный и вертикальный коэффициенты фильтрации для условных высокопроницаемых каналов приняты на 1—2 порядка выше коэффициентов фильтрации основных горизонтов закачки I и II.

Время моделирования составляло 1 млн лет, при этом рассчитывалось распространение только ^{239}Pu как долгоживущего радионуклида, сохраняющего потенциальную опасность на

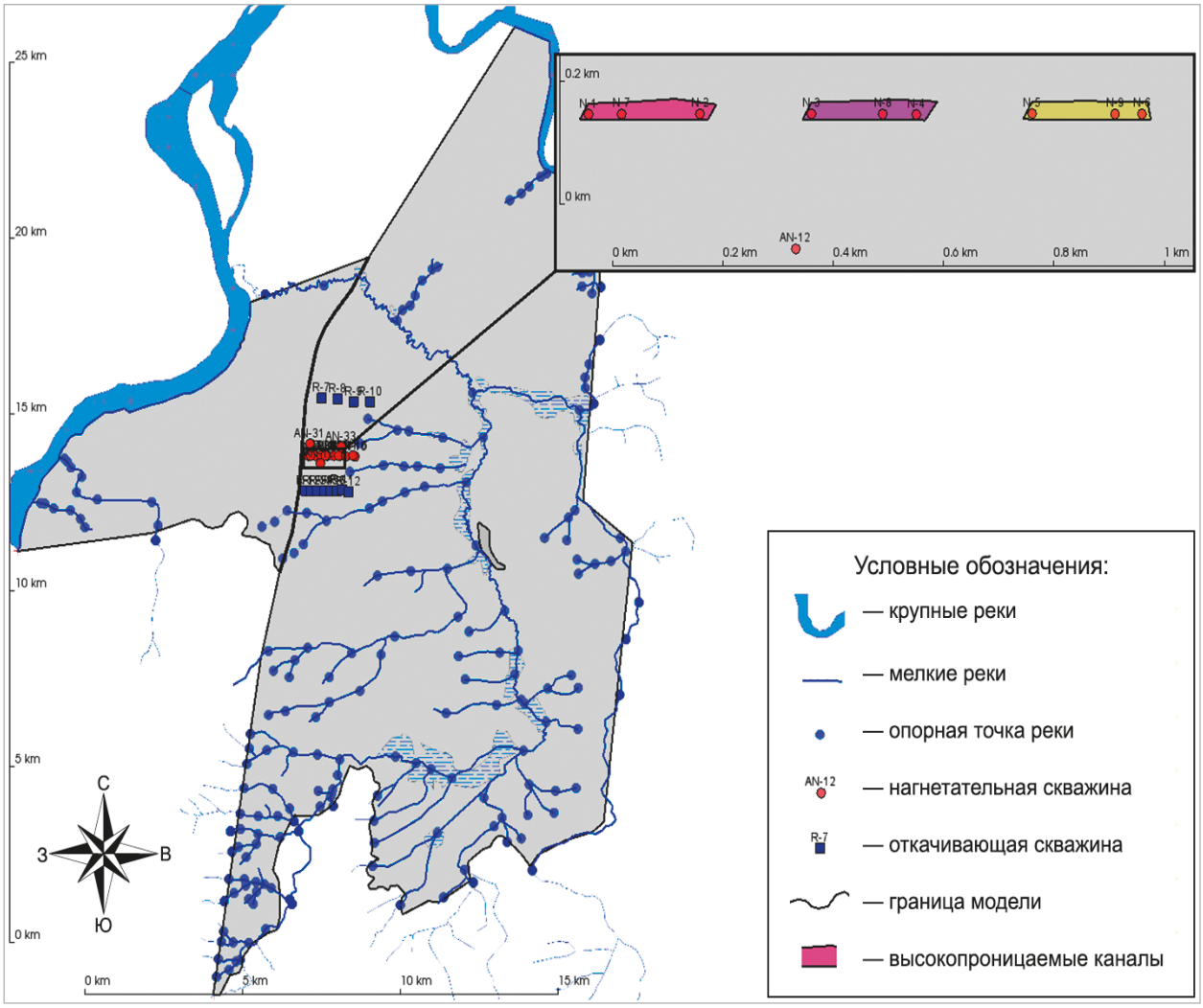

Рис. 2. Расположение условных вертикальных высокопроницаемых каналов, для оценки влияния нарушений затрубной зоны скважин или образований высокопроницаемых зон в горных породах

длительный период. Предполагалось, что геологическая среда в рамках границ модели за весь период моделирования не будет претерпевать дополнительных существенных изменений.

Распространение ореола ^{239}Pu (граница по значению уровня вмешательства (0,55 Бк/кг) [15]) на разные моменты времени представлено на рис. 3. Как видно из рисунка, можно констатировать вертикальную миграцию из нижележащего горизонта закачки в вышележащие слои при условии сделанных выше предположений и допущений. Интерес представляет активность выше УВ — красный цвет на шкале активности. Однако следует отметить, что содержание загрязнителя в водах верхнего (четвертичного) горизонта не превышает уровня удельной активности, равного УВ, так как в вышележащих горизонтах (выше II эксплуатационного) гидравлические напоры выше, чем в нижележащих. Картина гидроизогипс в разрезе разработанной модели хорошо согласуется с ранее полученными результатами [1, 16]. По сути, вертикальная миграция с водным потоком наблюдается только до II эксплуатационного горизонта; в вышезалегающий горизонт Г загрязнитель мигрирует за счет процессов диффузии. Значительная миграция в плане не наблюдается вследствие сорбции. Следует отметить, что приблизительно через 650 тыс. лет удельная активность ^{239}Pu становится ниже УВ во всех зонах моделируемой области.

Для моделирования сценария горизонтальной миграции по зонам повышенной проницаемости к естественным дренам в I эксплуатационном горизонте были заданы условные высокопроницаемые каналы (см. рис. 4 и 5).

Горизонтальный коэффициент фильтрации условных высокопроницаемых каналов принят на 1—2 порядка выше, чем для пород I горизонта. Появление столь протяженных каналов гипотетически возможно вследствие, например, землетрясения с высокой интенсивностью,

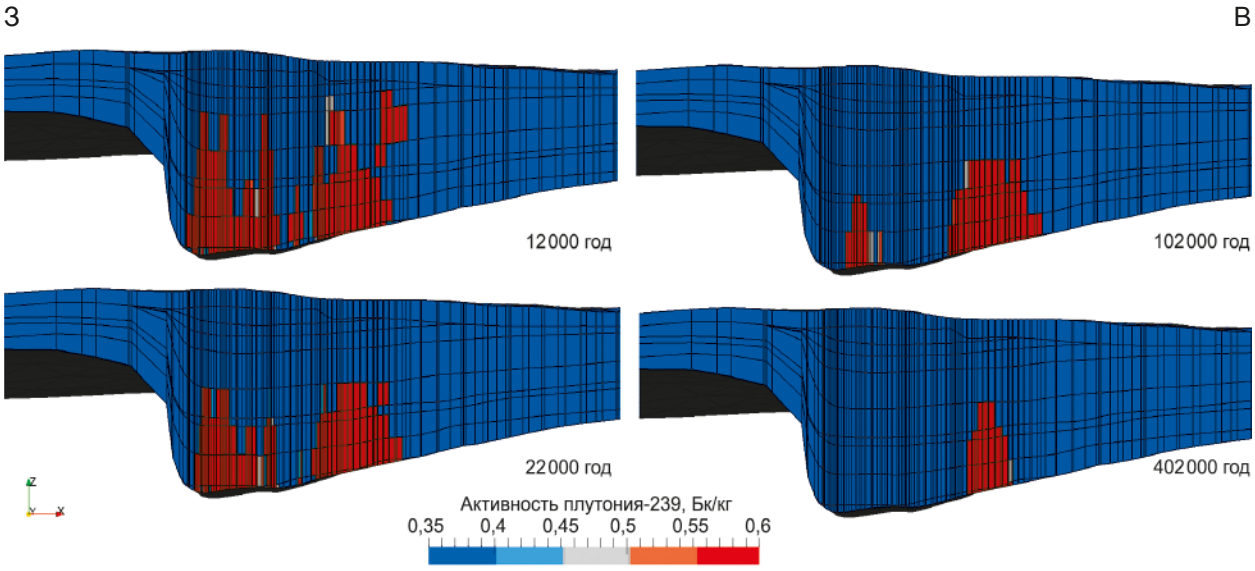

Рис. 3. Ореол распространения ^{239}Pu в разрезе через условные высокопроницаемые каналы на различные моменты времени

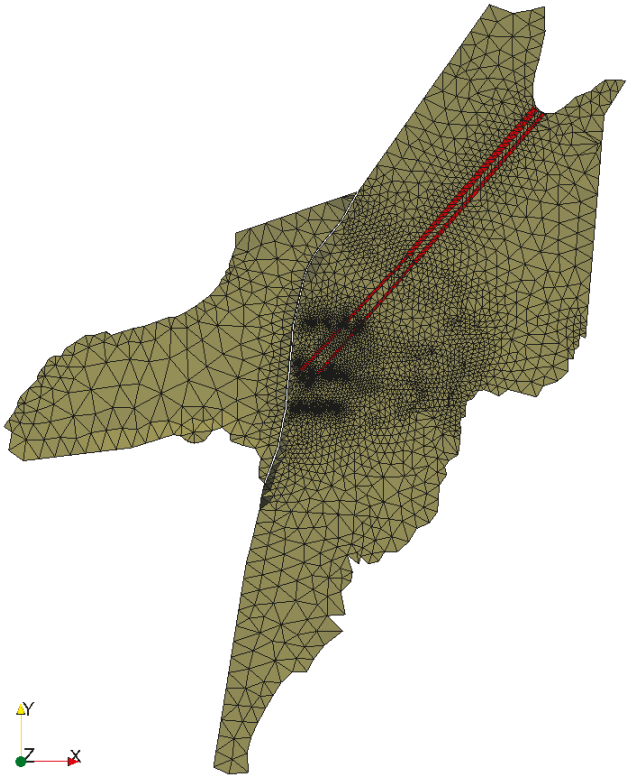

Рис. 4. Условные высокопроницаемые каналы в пределах I эксплуатационного горизонта модели полигона «Северный»

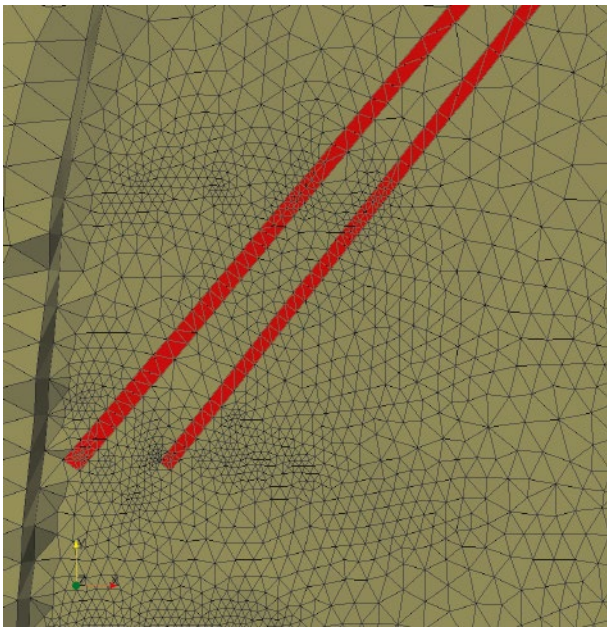

Рис. 5. Фрагмент расчетной треугольно-призматической сетки, учитывающей геометрию условных высокопроницаемых каналов модели полигона «Северный»

которое с учетом состава отложений Тельской впадины и ее расположения представляется маловероятным. Но с учетом различных неопределенностей в будущем и для понимания масштабов последствий в качестве консервативного сценария были приняты проницаемые каналы, соединяющие ПГЗ ЖРО с зоной разгрузки.

Сорбционные и диффузионные характеристики высокопроницаемых зон приняты полностью идентичными характеристикам эксплуатационного горизонта I [14].

Динамика распространения ореола ^{239}Pu представлена на рис. 6—8. Максимальная миграция от места нагнетания ЖРО при этом гипотетическом предположении составила 4 км. Распространение ^{239}Pu с удельными активностями, равными или превышающими УВ, до зоны разгрузки не прогнозируется.

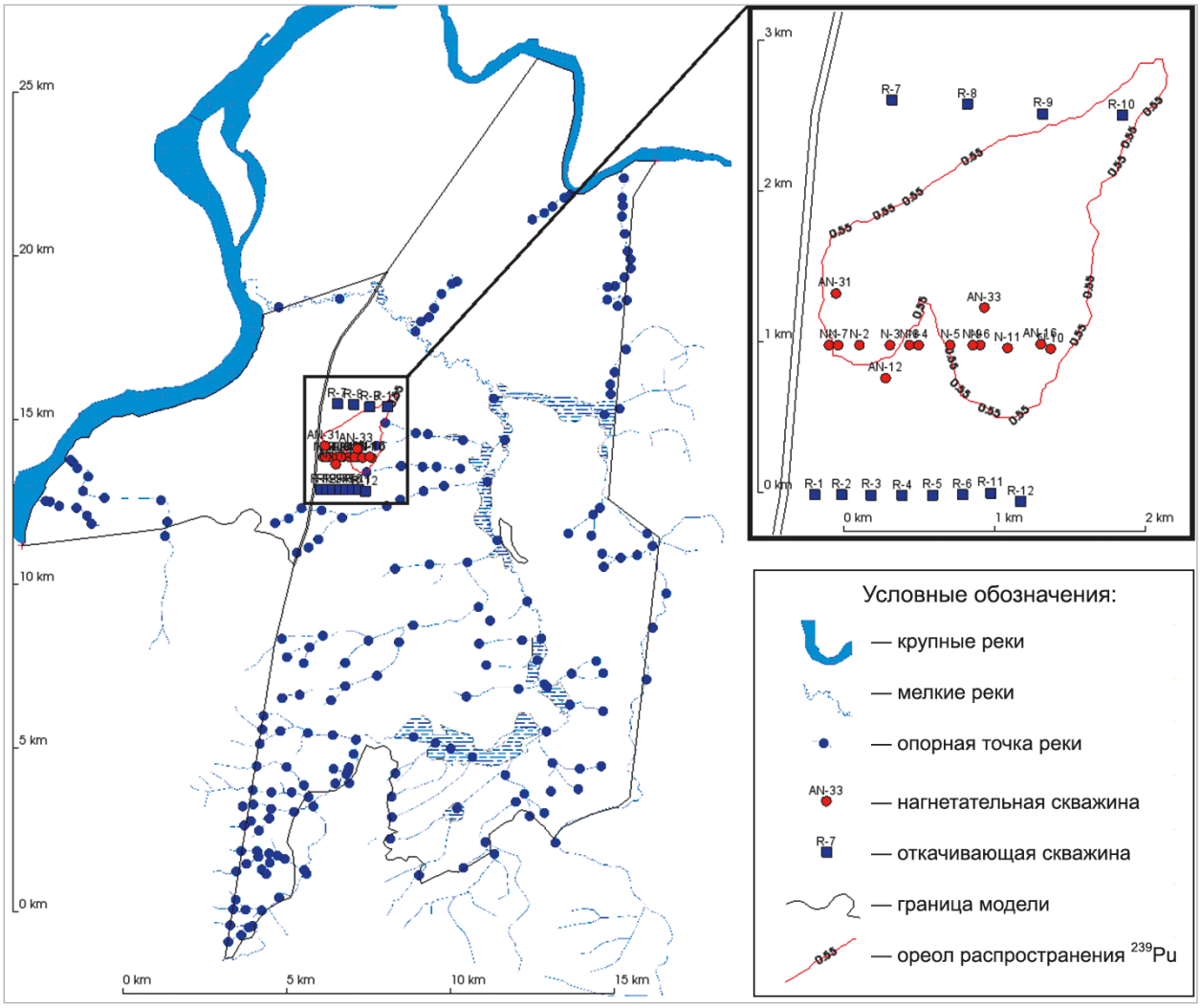

Рис. 6. Ореол распространения ^{239}Pu (соответствует УВ в питьевой воде согласно [15] — 0,55 Бк/кг) в I горизонте в модели с условными высокопроницаемыми каналами на 32 000 год

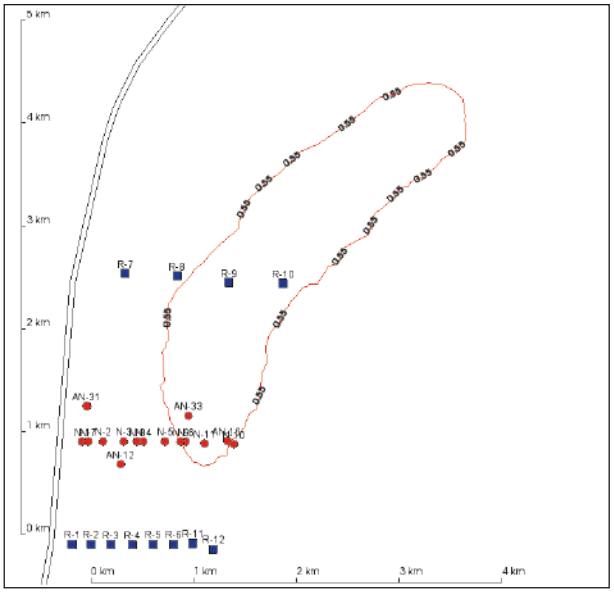

Рис. 7. Ореол распространения ^{239}Pu (соответствует УВ в питьевой воде согласно [15] — 0,55 Бк/кг) в I горизонте в модели с условными высокопроницаемыми каналами на 302 000 год (черная рамка соответствует увеличенной области на рис. 6)

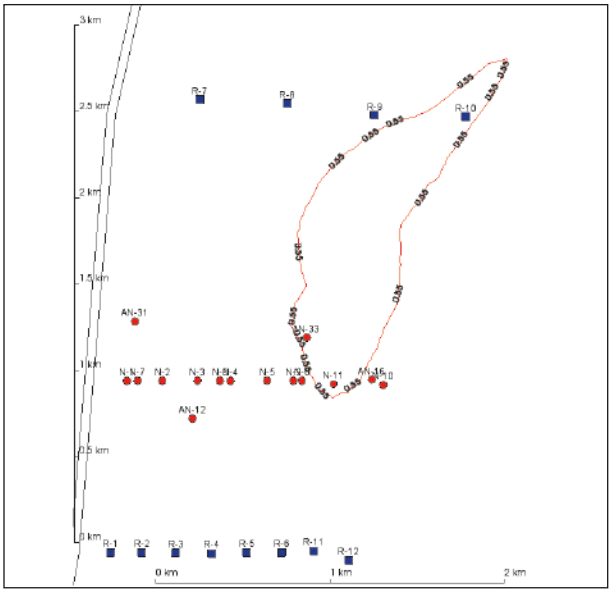

Рис. 8. Ореол распространения ^{239}Pu (соответствует УВ в питьевой воде согласно [15] — 0,55 Бк/кг) в I горизонте в модели с условными высокопроницаемыми каналами на 502 000 год (черная рамка соответствует увеличенной области на рис. 6)

Расчет последствий возможных нарушений нормальной эксплуатации на ПГЗ ЖРО

Радиологические последствия рассмотренных нарушений нормальной эксплуатации оценивались в форме обобщенного риска потенциального облучения. При этом возникновение рассмотренных нарушений нормальной эксплуатации не приводит к облучению персонала и населения свыше установленных НРБ-99/2009 пределов. В эксплуатационный период актуальным является риск облучения оперативного персонала, задействованного при ликвидации последствий аварий, вызванных выходом ЖРО за пределы технологического пространства оборудования.

Для ремонтно-восстановительных работ обобщенный риск потенциального облучения при k-м сценарии аварии определяется по формуле:

$$R_k = 5 \cdot 10^{-5} \cdot \Sigma p_k \cdot \Sigma \text{МАЭД}_{ijk} \cdot \Sigma t_{ijk} \cdot n_{iik}$$

где: p_k — вероятность реализации k-го сценария аварии, год$^{-1}$;

МАЭД_{ijk} — мощность амбиентного эквивалента дозы на i-м рабочем месте при j-й операции (виде работ), мЗв·ч$^{-1}$ для k-го сценария;

t_{ijk} — длительность j-й операции на i-м рабочем месте для k-го сценария;

n_{iik} — численность персонала на i-м рабочем месте при j-й операции (виде работ) для k-го сценария.

Для первого сценария — проведения ремонтно-восстановительных работ по ликвидации протечки среднеактивных РАО в случае разгерметизации трубопровода при его подземной прокладке — расчеты значений МАЭД на рабочих местах проводились методом Монте-Карло с помощью программы MCU-FR [17].

Суммарный обобщенный риск потенциального облучения персонала численностью n_k принимается равным $4{,}2 \cdot 10^{-5}$ чел·год$^{-1}$ для трудозатрат 40 чел·ч, при МАЭД = 7 мЗв·ч$^{-1}$, удельной аварийности $3 \cdot 10^{-4}$ км$^{-1}$·год$^{-1}$ и суммарной длине трубопроводов 10 км. Принимая условие, что ремонтно-восстановительные работы должны проводиться без планируемого повышенного облучения (раздел 3.2 НРБ-99/2009 [15]) обобщенный риск для лица из персонала группы А не превысит $3 \cdot 10^{-6}$ год$^{-1}$. Эта величина более чем в 10 раз ниже установленного граничного значения $2 \cdot 10^{-4}$ год$^{-1}$ для персонала [15].

Заключение

Проведенный вероятностный анализ безопасности ПГЗ ЖРО полигона «Северный» позволил оценить риски возникновения критических нарушений нормальной эксплуатации в наземной и подземной частях объекта.

В случае разгерметизации трубопроводов и оборудования в наземной части полигона частота событий консервативно оценивается на уровне $3 \cdot 10^{-4}$ год$^{-1}$·км$^{-1}$, а обобщенный риск потенциального облучения с учетом трудозатрат персонала при проведении ремонтно-восстановительных работ — $3 \cdot 10^{-6}$ год$^{-1}$.

Расчеты, проведенные с использованием ПС «ГЕОПОЛИС», показали безопасность захоронения ЖРО на ПГЗ ЖРО полигон «Северный» в условиях рассмотренных сценариев с учетом гипотетических крайне консервативных предположений об изменении фильтрационных свойств геологической среды. В целом расчеты свидетельствуют о приемлемом уровне риска возникновения нарушений нормальной эксплуатации (включая аварии) и обобщенного риска потенциального облучения при подземном захоронении ЖРО.

Литература

1. *Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и др.* Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М. : ИздАТ, 1994. 256 с.

2. *Лаверов Н. П., Величкин В. И., Омельяненко Б. И., Юдинцев С. В., Петров В. А., Бычков А. В.* Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы. Т. 5. М. : ИГЕМ РАН; ИФЗ РАН, 2008. 280 с.

3. Научно-техническое сопровождение международной экспертной проверки практики обращения в Российской Федерации с жидкими радиоактивными отходами путем закачивания в глубокие скважины. Отчет об оказании консультационных услуг: 31-05 / ФГБУ ИБРАЭ РАН; рук. И. И. Линге. М., 2013. 1211 с. — Арх. № 3934-1/4366-Д-1-1.

4. *Bickel J., Moieni P.* Probabilistic Risk Assessment. PRA1-Concepts and Principles. 1996.

5. Advances in reliability analysis and probabilistic safety assessment for nuclear power reactors. IAEA TECDOC-737. IAEA,1994/Vienna, 264 p.

6. *Pendala M., Hornet P., Mohamed A., Lemaire M.* Uncertainties arising in the assessment of structural reliability // Probabalistic and Environmental aspects of facture and fatigue. ASME. 1999. Vol. 386. Pp. 63—69.

7. *Gosselin S., Fleming K.* Evaluation of Pipe Failure Potential via Degradation Mechanism Assessment // Proceedings of ICON 5: 5th International Conference on Nuclear Engineering. Poster 2641-1997. 10 p.

8. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. ПБЯ РУ АС-89 // Атомная энергия. 1990. Т. 69. № 6. С. 409—422.

9. *Инюшин Н. В., Шайдаков В. В., Емельянов А. В., Чернова К. В.* Анализ эксплуатации промысловых трубопроводов Ватьеганского месторождения НГДУ «Повхнефть» // Нефтегазовое дело. 2002. № 1. С. 35—46.
10. *Гражданкин А. И., Дегтярев Д. В., Лисанов М. В., Печеркин А. С., Сидоров В. И., Сумской С. И.* Анализ риска промышленных аварий на нефтепроводах // Технологии топливно-энергетического комплекса. 2003. № 10. С. 57—62.
11. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах: Серия 27. Выпуск 1. 2-е изд., испр. М. : Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. 120 с.
12. *Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И.* Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. М. : Ин-октаво, 2005. 368 с.
13. Приказ Минпромэнерго России от 20.12.2004 № 172 «Об утверждении методики определения неучтенных расходов и потерь воды в системах коммунального водоснабжения».
14. Верификационный отчет «Программная реализация геофильтрационной геомиграционной модели полигона «Северный» (ГЕОПОЛИС)». Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. и др. М. : ИБРАЭ РАН, 2016. 154 с.
15. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 г. № 47. 93 с.
16. *Лопатин В. В., Камнев Е. Н., Рыбальченко А. И. и др.* Обоснование продления проектных сроков эксплуатации глубокого хранилища «полигон Северный» ФГУП «Горно-химический комбинат» до 2020 г. М. : ОАО «ВНИПИпромтехнологии», 2009. 157 с.
17. *Гуревич М. И., Калугин М. А., Олейник Д. С., Шкаровский Д. А.* Характерные особенности MCU-FR // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2016. Вып. 5. С. 17—21.
18. РД 153-39.4-114-01. Правила ликвидации аварий и повреждений на магистральных нефтепроводах. Утв. ОАО АК «Транснефть» 28.12.2001.
19. *Андрушечко С. А., Афров А. М., Васильев Б. Ю., Генералов В. Н., Косоуров К. Б., Семченков Ю. М., Украинцев В. Ф.* АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. М. : Логос, 2010. 603 с.

Информация об авторах

Сускин Виктор Викторович, младший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, ул. Большая Тульская, 52), e-mail: viksus@ibrae.ac.ru.

Савкин Михаил Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, ул. Большая Тульская, 52), e-mail: raduga202@rambler.ru.

Уткин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, заведующий отделением, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, ул. Большая Тульская, 52), e-mail: uss@ibrae.ac.ru.

Коновалов Владимир Юрьевич, директор департамента лицензирования, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, 49А, стр. 2), e-mail: VYKonovalov@norao.ru.

Понизов Антон Владимирович, начальник отдела, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Россия, Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8, корп. 5), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Библиографическое описание статьи

Сускин В. В., Савкин М. Н., Уткин С. С., Коновалов В. Ю., Понизов А. В. Применение эмпирического и расчетного методов при оценке возможных нарушений нормальной эксплуатации на объектах захоронения жидких РАО // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 22—34. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-22-34.

THE USE OF EMPIRICAL AND COMPUTATIONAL METHODS IN ASSESSING POSSIBLE ABNORMAL OPERATION AT LIQUID RADIOACTIVE WASTE DEEP DISPOSAL FACILITIES

Suskin V. V.[1], Savkin M. N.[1], Utkin S. S.[1], Konovalov V. Yu.[2] Ponizov A. V.[3]

[1]**Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia**
[2]**National Operator for Radioactive Waste management, Federal State Unitary Enterprise, Moscow, Russia**
[3]**Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia**

Article received on February 4, 2020

The paper evaluates the risk of anticipated operational occurrences at liquid radioactive waste deep disposal facility (LRW DDF) and their possible radiological consequences at the operational and post-closure stage. The evaluations were performed with due account of applicable federal norms and rules and sanitary rules concerning the safe disposal of liquid radioactive waste. The main options describing possible evolution of features, events and processes (including accidents) that can result in abnormal operation of the facility and involving some radiation consequences were considered. At the stage of waste predisposal treatment and injection itself, integrity loss of process pipelines, receiving tanks, pumps and other equipment associated with natural causes (due to corrosion, etc.) was considered as critical events for the deep disposal facility «Severniy», chosen as an example of such a facility. The frequency of such events was estimated using analog method with prototypes being considered as estimated pipeline damage at nuclear power plants and representative statistics of failures at petroleum pipelines and municipal water supply pipelines. The conservative value of the «pipeline leak rate» — the probability of abnormal operation occurrences during the waste pumping taken per kilometer of the pipeline amounted to $3 \cdot 10^{-4}$ year$^{-1} \cdot$km^{-1}. The calculations showed that taking into account relevant engineering and technical protection measures additional dose effects on staff not being directly involved in the repair operations and on the population are not expected if such events occur. The collective dose for personnel being directly involved in the repair and remedial operations can amount to 0.28 man-Sv given the established operating procedure developed for the case of intermediate-level liquid waste leakage in a buried reservoir. Assessment of the long-term severity of the consequences associated with potentially hazardous features, events and processes was carried out using the software "GEOPOLIS" (Program code — PC "GEOPOLIS") by means of numerical simulation.

Keywords: *radioactive waste; liquid radioactive waste; regulatory requirements; safety case; features, events and processes; external effects of natural and anthropogenic origin; probability safety assessment; potential radioactive exposure; deep disposal facility "Severniy"; analog method; PC "GEOPOLIS".*

References

1. Rybalchenko A. I., Pimenov M. K., Kostin P. P. et al. *Glubinnoe zahoronenie zhidkih radioaktivnyh othodov* [Deep disposal of liquid radioactive waste]. Moscow, IzDat Publ., 1994. 256 p.

2. Laverov N. P., Velichkin V. I., Omelyanenko B. I., Yudintsev S. V., Petrov V. A., Bychkov A. V. *Izolyaciya otrabotavshih yadernyh materialov: geologo-geohimicheskie osnovy* [Isolation of spent nuclear materials: geological and geochemical basis]. V. 5. Moscow, IGEM RAS Publ., IPP RAS Publ., 2008. 280 p.

3. Nauchno-tekhnicheskoe soprovozhdenie mezhdunarodnoj ekspertnoj proverki praktiki obrashcheniya v Rossijskoj Federacii s zhidkimi radioaktivnymi othodami putem zakachivaniya v glubokie skvazhiny [Scientific and technical support of the international expert review of the practice of liquid radioactive waste management in the Russian Federation by injection into deep wells]. *Report on the advisory engagement*. Moscow, IBRAE RAS Publ., 2013. 1211 p.

4. Bickel J., Moieni P. *Probabilistic Risk Assessment*. PRA1-Concepts and Principles. 1996.

5. Advances in reliability analysis and probabilistic safety assessment for nuclear power reactors. IAEA TECDOC-737. IAEA,1994/Vienna, 264 p.

6. Pendala M., Hornet P., Mohamed A., Lemaire M. Uncertainties arising in the assessment of structural reliability // *Probabalistic and Environmental aspects of facture and fatigue. ASME*. 1999. Vol. 386. P. 63—69.

7. Gosselin S., Fleming K. Evaluation of Pipe Failure Potential via Degradation Mechanism Assessment // *Proceedings of ICON 5: 5th International Conference on Nuclear Engineering*. Poster 2641-1997. 10 p.

8. Pravila yadernoj bezopasnosti reaktornyh ustanovok atomnyh stancij. PBYA RU AS-89 [Nuclear Safety Rules of Reactor Plants of Nuclear Power Plants. PBYa RU AS-89]. *Atomnaya energiya — Atomic energy,* 1990, vol. 69, no. 6, pp. 409—422.

9. Inyushin N. V., Shaydakov V. V., Emelyanov A. V., Chernova K. V. Analiz ekspluatacii promyslovyh truboprovodov Vat'eganskogo mestorozhdeniya NGDU

"Povhneft" [Analysis of the operation of field pipelines of the Vategansky field «Povkhneft»]. *Neftegazovoe delo — Oil and Gas Business,* 2002, no. 1, pp. 35—46.
10. Grazhdankin A. I., Degtyarev D. V., Lisanov M. V., Pecherkin A. S., Sidorov V. I., Sumskaya S. I. Analiz riska promyshlennyh avarij na nefteprovodah [Risk analysis of industrial accidents at oil pipelines]. *Tekhnologii toplivno-energeticheskogo kompleksa — Fuel and Energy Complex Technologies,* 2003, no. 10, pp. 57—62.
11. *Metodicheskoe rukovodstvo po ocenke stepeni riska avarij na magistral'nyh nefteprovodah* [Guidelines for assessing the degree of risk accidents at oil pipelines]. Ser. 27, issue 1, 2nd ed. Moscow, State Unitary Enterprise "Scientific and Technical Center for Safety in Industry of the Gosgortekhnadzor of Russia" Publ., 2002. 120 p.
12. Vorobyov Yu. L., Akimov V. A., Sokolov Yu. I. *Preduprezhdenie i likvidaciya avarijnyh razlivov nefti i nefteproduktov* [Prevention and response to emergency oil and oil product spills]. Moscow, In-octavo Publ., 2005. 368 p.
13. *Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya neuchtennyh raskhodov i poter' vody v sistemah kommunal'nogo vodosnabzheniya* [On approval of the methodology for determining unaccounted costs and water losses in public water supply systems]. Order of the Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation, December 20, 2004, no. 172.
14. Linge I. I., Utkin S. S., Savelyeva E. A. et al. *Programmnaya realizaciya geofil'tracionnoj geomigracionnoj modeli poligona «Severnyj» (GEOPOLIS)* [Software implementation of the geofiltration geomigration model of the Severny polygon (GEOPOLIS)]. Verification report. Moscow, IBRAE RAS Publ., 2016. 154 p.
15. NRB-99/2009. *Normy radiacionnoj bezopasnosti. Sanitarnye pravila i normativy.* SanPiN 2.6.1.2523-09 [Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Radiation Safety Norms (NRB 99/2009)]. 2009, 93 p.
16. Lopatin V. V., Kamnev E. N., Rybalchenko A. I. et al. *Obosnovanie prodleniya proektnyh srokov ekspluatacii glubokogo hranilishcha "poligon Severnyj" FGUP "Gorno-himicheskij kombinat" do 2020 g.* [Justification for the extension of the exploitation period of the deep disposal facility "Severny" of the Federal State Unitary Enterprise "Mining and Chemical Plant" until 2020]. Moscow, JSC VNIPIpromtechnologii Publ., 2009. 157 p.
17. Gurevich M. I., Kalugin M. A., Oleinik D. S., Shkarovsky D. A. Harakternye osobennosti MCU-FR [Features of MCU-FR]. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya Fizika yadernyh reaktorov — VANT. Ser. Nuclear Reactor Physics.* 2016, no. 5, pp. 17—21.
18. RD 153-39.4-114-01. *Pravila likvidacii avarij i povrezhdenij na magistral'nyh nefteprovodah* [Regulations on Response to Accidents and Damage on Trunk Petroleum Pipelines]. Approved by Transneft on December 28, 2001.
19. Andrushechko S. A., Afrov A. M., Vasil'ev B. Yu., Generalov V. N., Kosourov K. B., Semchenkov Yu. M., Ukraincev V. F. *AES s reaktorom tipa VVER-1000. Ot fizicheskih osnov ekspluatacii do evolyucii proekta* [NPPs with VVER-1000 type reactor. From the physical foundations of operation to the evolution of the project]. Moscow, Logos Publ., 2010. 604 p.

Information about the authors

Suskin Viktor Viktorovich, Junior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya, Moscow, 115191, Russia), e-mail: viksus@ibrae.ac.ru.

Savkin Mikhail Nikolaevich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya, Moscow, 115191, Russia), e-mail: raduga202@rambler.ru.

Utkin Sergey Sergeevich, PhD, Head of Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya, Moscow, 115191, Russia), e-mail: uss@ibrae.ac.ru.

Konovalov Vladimir Yuryevich, Head of licensing Department, National Operator for Radioactive Waste management, Federal State Unitary Enterprise (49A, Bld.2, Pyatnitskaya St., Moscow, 119017, Russia), e-mail: VYKonovalov@norao.ru.

Ponizov Anton Vladimirovich, Head of Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140, Russia), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Bibliographic description

Suskin V. V., Savkin M. N., Utkin S. S., Konovalov V. Yu., Ponizov A. V. The use of empirical and computational methods in assessing possible abnormal operation at liquid radioactive waste deep disposal facilities. *Radioactive Waste,* 2020, no. 1 (10), pp. 22—34. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-22-34.