УДК 556.3:504.3.64.36

Н. Б. Стариков, А. М. Алферов, Н. И. Панасюк, И. А. Литвин, Е. П. Люшня

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ НА ПРОМПЛОЩАДКЕ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

Выполнен прогноз миграции ^{90}Sr в зоне аэрации малой мощности под влиянием атмосферных осадков в условиях строительства котлована южной ленты фундамента нового безопасного конфайнмента. Прогноз выполнен методом математического моделирования с помощью специальной программы, решающей систему дифференциальных уравнений, описывающих процесс влаго- и массопереноса в грунтах неполного водонасыщения.

Ключевые слова: математическое моделирование, миграция радионуклидов, зона аэрации, коэффициент распределения.

Одним из источников загрязнения грунтовых являются инфильтрационные воды, которые формируются в результате влагопереноса через грунты зоны аэрации атмосферных осадков или поверхностных вод. Химический состав инфильтрационных вод определяется процессами выщелачивания поровой влагой химических веществ и соединений из твердой фазы грунтов.

Наиболее эффективным при изучении динамики воды и солей в ненасыщенных водой грунтах является метод математического моделирования, который заключается в решении дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих процессы влаго- и массопереноса в грунтах зоны аэрации. Математическое моделирование рассматривается как альтернатива прямым методам исследования, которые в силу определенных условий провести для изучаемого процесса нельзя.

Моделирование процесса миграции влаги и солей в грунтах зоны аэрации для локальной зоны объекта «Укрытие» в отличие от моделирования процессов гидродинамики для водонасыщенных грунтов до настоящего времени не проводилось.

При строительстве котлована для южной ленты фундамента нового безопасного конфайнмента (НБК), который вскрыл «активный слой», была уменьшена мощность зоны аэрации с 6,5 до 3,5 м, произошло аккумулирование атмосферных осадков в котловане в течение примерно одного года. Таким образом, до бетонирования открытого дна котлована «тощим бетоном» создались благоприятные условия для формирования загрязненных радионуклидами инфильтрационных вод и поступления их в первый от поверхности водоносный горизонт грунтовых вод. В связи с этим возник вопрос об оценке поступления радионуклидов на поверхность грунтовых вод. Для этого была создана фильтрационная модель котлована с помощью программ SEEP/W DEFINE и CTRAN/W DEFINE. Программы позволяют моделировать миграцию в гетерогенных и анизотропных грунтах с учетом пространственной изменчивости фильтрационных параметров и инфильтрации. Модель объекта задается системой дифференциальных уравнений в частных производных, которые аппроксимируются методом конечных элементов.

Для численного моделирования миграции радионуклидов в зоне аэрации решалась профильная задача для колонки грунта шириной 10 м, высотой 3 м и длиной 1 м, ограниченной снизу уровнем грунтовых вод, а сверху дневной поверхностью котлована. Моделирование нестационарной миграции радионуклидов в зоне аэрации под дном котлована проводилась на основе выполненных фильтрационных расчетов скоростей влагопереноса через профиль грунта при задаваемой интенсивности атмосферных осадков. На модели воспроизводились условия с однородным литологическим строением. На рис. 1 приведена расчетная колонка зоны аэрации с заданной геометрией. Вся область фильтрации была разбита на 750 расчетных элементов четырехугольниками размером 0,2 × 0,2 м, с общим количеством расчетных узлов 816.

© Н. Б. Стариков, А. М. Алферов, Н. И. Панасюк, И. А. Литвин, Е. П. Люшня, 2012

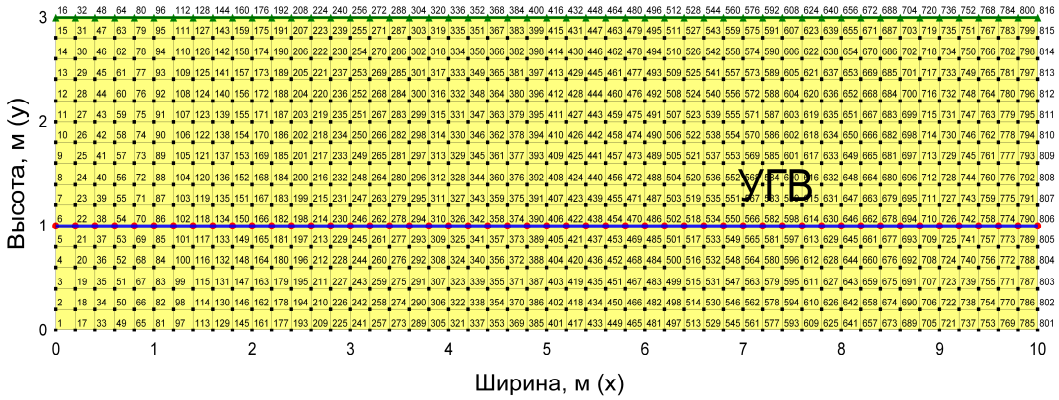

Рис. 1. Размеры принятой для моделирования колонны грунта.

Уравнение влагопереноса в ненасыщенных водой грунтах в направлении x и y во времени имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_X(h)\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_Y(h)\frac{\partial H}{\partial y}\right)+Q=\frac{\partial\theta}{\partial t}, \qquad (1)$$

где H – значения напора, учитывающего совместное влияние энергии давления h и энергии положения y $(H = h + y)$; k_X, k_Y – коэффициенты влагопереноса; Q – источник поступления влаги в грунт; θ – объемная влажность грунта; h – поровое давление.

Для моделирования в зоне аэрации необходимо задавать такие нелинейные параметры влагопереноса, как $k(h)$ и $\theta(h)$, которые для каждого грунта являются индивидуальными и определяются эмпирическим путем. Для случая с однородным строением зоны аэрации сложенной песками были приняты зависимости $k(h)$ и $\theta(h)$, выбранные из базы водно-физических характеристик для различных типов грунтов и их литологических разностей в программе SEEP/W DEFINE. Значения коэффициента влагопереноса k соответствует коэффициенту фильтрации для зоны полного водонасыщения, принимаемому для верхней части аллювиальных песков в районе ЧАЭС.

При решении фильтрационной задачи в качестве граничных условий принималось:

1. На поверхности грунта величина атмосферных осадков задавалась, как ступенчатая функция изменения единичного расхода по месяцам, согласно данным метеостанции «Чернобыль». За расчетный период суммарное количество осадков составляет 657,4 мм.

2. В нижней части моделируемой зоны аэрации задавалось положение поверхности уровня грунтовых вод (УГВ).

Расчет продвижения фронта увлажнения от поверхности грунта до УГВ проводился для периода 1 год с интервалом 1 сут. Расчетный период был выбран из соображений, что котлован в открытом (не забетонированном) виде, когда осадки проникали на УГВ по сокращенному пути фильтрации, существовал приблизительно год.

Наблюдаемый на модели характер изменения содержания поровой влаги во времени не противоречит представлениям о зависимости между поступлением атмосферных осадков и изменением объемного влагосодержания в массиве грунта.

Основной формой переноса вещества в грунтах зоны аэрации является конвективно-дисперсионный перенос, который связан с потоком влаги, вызванный разностью напоров.

Основное дифференциальное уравнение конвективного переноса вещества с раствором для одномерной геофильтрации в ненасыщенных грунтах имеет вид

$$\theta\frac{\partial C}{\partial t}=-\frac{\partial}{\partial x}\left(-\theta D\frac{\partial C}{\partial x}+VC\right)=-\theta D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}-V\frac{\partial C}{\partial x}, \qquad (2)$$

где C – концентрация транспортируемого вещества в единице объема воды; D–коэффициент гидродинамической дисперсии.

Добавив сорбционный член в уравнение (2) с учетом радиоактивного распада, получим дифференциальное уравнение, которое можно использовать для численного математического моделирования геомиграции радионуклидов в грунтах зоны аэрации

$$\theta\frac{\partial C}{\partial t} + \rho_d\frac{\partial S}{\partial C}\frac{\partial C}{\partial t} = \theta D\frac{\partial C^2}{\partial x^2} - V\frac{\partial C}{\partial x} - \lambda\theta C - \lambda S\rho_d$$

или

$$\left(\theta + \rho_d\frac{\partial S}{\partial C}\right)\frac{\partial C}{\partial t} = \theta D\frac{\partial C^2}{\partial x^2} - V\frac{\partial C}{\partial x} - \lambda\theta C - \lambda S\rho_d\,. \qquad (3)$$

Дальнейший этап численного моделирования заключается в моделировании миграции радионуклидов с потоком влаги в зоне аэрации, используя полученные ранее при решении фильтрационных задач скорости влагопереноса по вертикали при заданных начальных граничных условиях на выбранные расчетные моменты времени.

Наиболее распространенным и во многом определяющим самоочищающую способность водоносных комплексов является процесс сорбции, заключающийся в совместном действии адсорбции и десорбции, т. е. связывания и освобождения мигрантов на поверхности твердой фазы грунта.

При достаточно длительном взаимодействии раствора и породы зависимость между концентрацией мигранта в растворе C и на твердой фазе S оказывается для данной температуры однозначной и определяет вид изотермы сорбции

$$S = f(C), \qquad (4)$$

где S – сорбционная емкость, определяемая как предельно возможное в данных условиях содержание мигранта в единице объема породы. Форма и параметры изотермы сорбции устанавливаются экспериментально. Наиболее простой и употребительной является линейная изотерма Генри

$$S = k_d C\,, \qquad (5)$$

где константа k_d называется коэффициентом распределения для данной пары «мигрирующий компонент – порода». Для несорбируемых мигрантов k_d = 0, а для хорошо сорбируемых – величина k_d измеряется сотнями и даже тысячами.

Для моделирования миграции радионуклидов в зоне аэрации в качестве источника загрязнения были использованы данные, полученные при выполнении гамма-каротажа скважин для свай шпунтового ограждения котлованов – так называемый «активный слой», который сформировался в результате аварии на ЧАЭС. Для изучения геомиграции из активного слоя был выбран ^{90}Sr как наиболее подвижный в окружающей среде радионуклид. Для воспроизведения на модели распространения ^{90}Sr был выбран характерный участок с высоким загрязнением грунтов. Моделировался процесс десорбции стронция из активного слоя и его дальнейшая сорбция грунтами по мере продвижения фронта загрязнения к УГВ. Степень извлечения радиоактивного изотопа также зависит от химического состава раствора и природы катионов, присутствующих в десорбирующем растворе. Для грунта, представленного песком, коэффициент распределения k_d, связывающий содержания ^{90}Sr в твердой фазе грунта и в поровом растворе, был принят равным 1 мл/г, по данным экспериментальных определений для эоловых песков в зоне отчуждения. В программе CTRAN/W.DEFINE для моделирования миграции любого компонента с водным раствором подземных вод начальная концентрация в источнике загрязнения должна задаваться в г/м^3 в объеме порового раствора воды. Значения удельной активности грунта в Бк/г были пересчитаны в концентрации порового раствора в г/м^3. Продольная дисперсия α_L = 0,1 м, поперечная дисперсия α_T = 0,01 м. Значение плотности сухого песка ρ_d = 1,7 г/см^3. Период полураспада для ^{90}Sr составляет T = 9,17·10^8 с.

Мощность «активного слоя» и глубина заложения от поверхности составляла 0,8 м. Значения концентраций были заданы неравномерно как по глубине, так и в горизонтальном направлении, согласно измеренным удельным активностям грунтов. Распределение концентраций на начальный расчетный момент времени представлено на рис. 2. Изолинии концентраций проведены через 0,001 г/м^3 (5,06·10^6 Бк/л).

Рис. 2. Распределение концентраций ^{90}Sr в поровом растворе по разрезу в зоне аэрации на начальный расчетный момент времени.

В результате выполнения моделирования миграции ^{90}Sr из «активного слоя» вследствие инфильтрации атмосферных осадков было получено распределение концентраций стронция в поровом растворе по разрезу в зоне аэрации. На рис. 3 представлено распределение на последний расчетный момент времени (3,15·10^7 с = 365 сут).

Изолинии концентраций проведены через 0,0005 г/м^3 (2,53·10^6 Бк/л). Максимальное значение наблюдается в интервале 1,4 – 1,6 м над УГВ. Уменьшение слева направо концентраций ^{90}Sr обусловлено характером распределения исходных значений концентраций и удельных активностей в выделяемом в разрезе «активном слое».

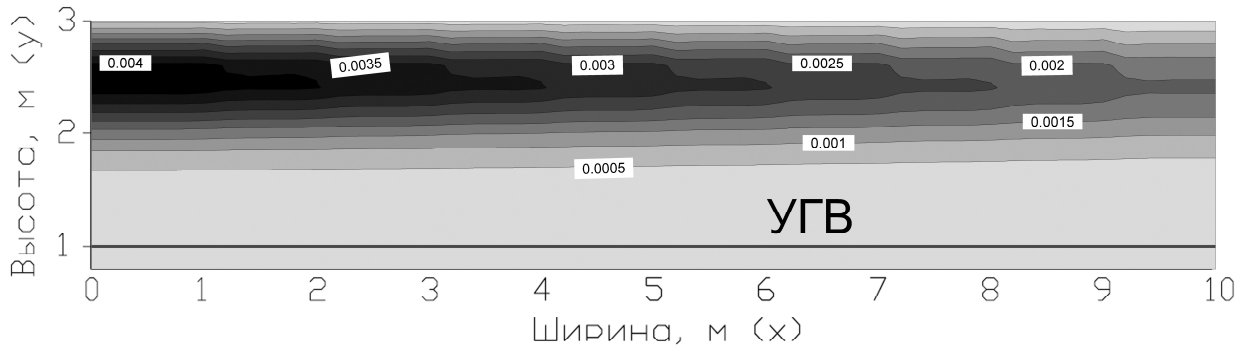

Рис. 3. Распределение концентраций ^{90}Sr в поровом растворе по разрезу в зоне аэрации на момент времени 365 сут с начала поступления атмосферных осадков на дно котлована.

Согласно эпюре прогнозных распределений значений содержания ^{90}Sr по разрезу зоны аэрации от «активного слоя» на последний расчетный момент времени (3,15·10^7 с = = 365 сут) максимальное значение концентрации с учетом сорбции и распада (0,004327 г/м^3 = = 2,19·10^{10} Бк/м^3) зафиксировано на отметке 1,4 м над УГВ.

На рис. 4 показаны графики изменения содержания массы ^{90}Sr в «активном слое» во времени в воде порового раствора и в объеме грунта в результате процесса десорбции его инфильтрационным потоком в ненасыщенном водой песке.

За расчетный период общее содержание ^{90}Sr в грунте и воде «активного слоя» в результате десорбции и выноса потоком фильтрующейся влаги, а также радиоактивного распада уменьшается незначительно – в 1,44 раза, хотя происходит перераспределение вниз по разрезу, и составляет на конец указанного момента времени 1,69·10^{11} Бк.

Скорость поступления или массопереноса ^{90}Sr на уровень грунтовых вод с потоком влаги, как видно из графика на рис. 5, со временем увеличивается.

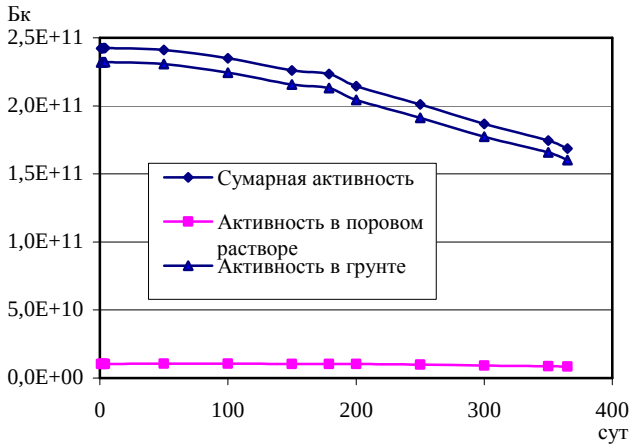

Рис. 4. Изменение активности ^{90}Sr в грунте, в воде и в общей массе грунта «активного слоя».

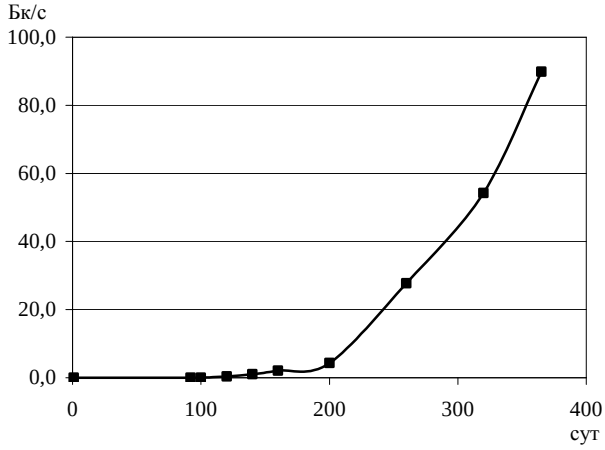

Рис. 5. Изменение скорости массопереноса ^{90}Sr (Бк/с) на УГВ по результатам прогнозных расчетов.

Увеличение скорости массопереноса ^{90}Sr (Бк/с) на УГВ во времени происходит не из-за увеличения скорости влагопереноса, а из-за перераспределения по разрезу значений концентраций ^{90}Sr в поровом растворе грунта. Из-за перераспределения содержания ^{90}Sr от «активного слоя» вниз по разрезу грунта и увеличения скорости поступления массы загрязнителя основные поступления ^{90}Sr на УГВ (в пересчете, Бк/сут) отмечаются после 200 сут.

Суммарная величина поступлений ^{90}Sr за расчетный период 1 год составила $5{,}91 \cdot 10^8$ Бк с поперечного сечения 10 м^2. Около 97 % от суммарной величины поступлений в водоносный горизонт по результатам моделирования приходится на период времени 200 – 365 сут.

Как уже отмечалось выше, активный слой имеет неоднородное сложение. Если существуют участки, сложенные породами с различными коэффициентами распределения, следует предполагать, что скорости миграции радионуклидов в зоне аэрации также будут отличаться. Это предположение было проверено на существующей модели уменьшением коэффициента распределения до 0,1 мл/г.

В отличие от варианта расчета с коэффициентом распределения 1 мл/г, где максимальное значение концентрации радионуклидов в поровом растворе зоны аэрации на конец расчетного периода времени отмечалось на глубине 1,4 м, для данного случая максимальная концентрация наблюдается на глубине 2 м, что соответствует УГВ. Из этого следует, что на участках, где зона аэрации представлена грунтами с уменьшенными в 10 раз сорбционными свойствами (k_d = 0,1 мл/г), фронт загрязнения достигнет УГВ к концу расчетного периода времени. К таким грунтам могут относиться грунты с крупной фракцией, а также техногенные грунты.

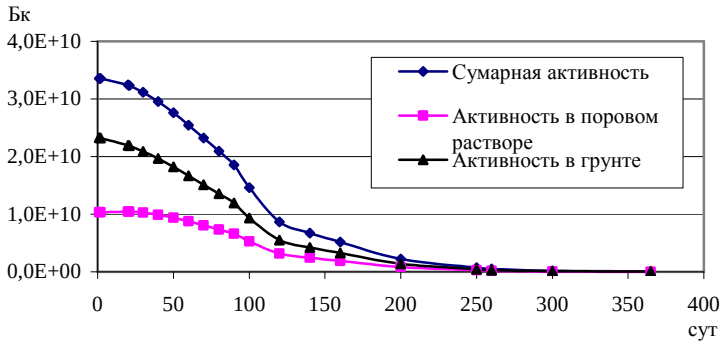

Рис. 6. Изменение активности ^{90}Sr в грунте, в поровом растворе и в общей массе грунта «активного слоя».

На рис. 6 видно, что при k_d = 0,1 мл/г снижение содержания ^{90}Sr в массе грунта, слагающего «активный слой», к концу 365 сут происходит практически до 0.

На рис. 7 отображены две линии, которые характеризуют скорость поступления ^{90}Sr на УГВ при разных значениях k_d. При их сравнении видно, что скорость поступления при меньшем коэффициенте распределения на 2 порядка больше. Значительный рост скорости поступления ^{90}Sr наблюдается после 100 сут и достигает максимума на 259-е сутки. После этого начинается постепенное снижение скорости поступления, что подтверждает предположение о том, что скорость поступления радионуклидов увеличивается вследствие продвижения фронта загрязнения вниз от «активного слоя» к УГВ, а снижение скорости можно объяснить прохождением фронта максимальных концентраций радионуклидов ниже расчетного сечения.

Суммарная величина поступлений ^{90}Sr за расчетный период времени составляет $2{,}6 \cdot 10^{10}$ Бк с поперечного сечения 10 м^2. Значения суммарной активности, поступившей на УГВ при k_d = 0,1 мл/г, закономерно отличается на 2 порядка от значений, полученных при расчете с k_d = 1 мл/г, что проиллюстрировано на рис. 8. Основные объемы поступления загрязнения (около 99 %) приурочены к расчетному периоду 100 – 365 сут. Более 77 % от исходного количества ^{90}Sr, находившегося в грунте и поровом растворе «активного слоя», поступило на УГВ за весь расчетный период. И менее 1 % активности ^{90}Sr осталось в «активном слое».

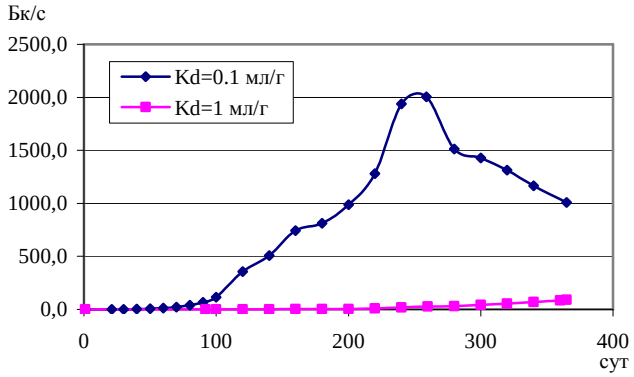

Рис. 7. Изменение скорости массопереноса ^{90}Sr (Бк/с) на УГВ по результатам прогнозных расчетов.

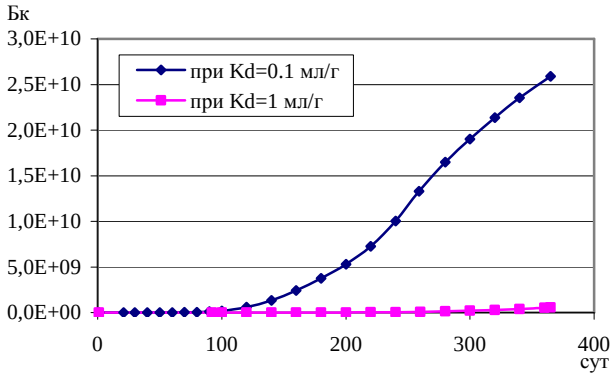

Рис. 8. Интегральная кривая активности ^{90}Sr, поступившего из зоны аэрации в водоносный горизонт за весь моделируемый период времени.

Строение зоны аэрации с «активным слоем» в районе объекта «Укрытие» неоднородно. Это в значительной степени влияет как на фильтрационные, так и на сорбционные свойства грунтов. Также на миграционные свойства радионуклидов, способность их к десорбции и адсорбции влияет химический состав фильтрующейся воды и грунтов зоны аэрации. Учитывая это, полученные результаты могут рассматриваться для представления общей закономерности миграции радионуклидов в зоне аэрации небольшой мощности с фронтом влаги.

Фронт максимальных значений концентрации ^{90}Sr за моделируемый период времени продвинулся на 40 см вниз по разрезу зоны аэрации.

На принятой модели влаго- и массопереноса в зоне аэрации были выполнены расчеты с различными вариантами граничных условий и коэффициентами распределения. При уменьшении коэффициента распределения сорбция уменьшается, естественно увеличивается скорость десорбции радионуклидов из активного слоя и поступление их на УГВ.

Поскольку на протяжении всей южной ленты котлована для строительства фундамента НБК, который вскрыл «активный слой», практически в течение года создались условия для поступления атмосферных осадков и их дальнейшего просачивания через загрязненный грунт, необходимо проводить режимные наблюдения за объемными активностями радионуклидов ниже УГВ по всей длине ленты фундамента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Радиологические* исследования грунтов в котлованах и скважинах. Северная и Южная ленты фундаментов НБК (окончательный отчет). SIP 09-02-001 NI03 RPT 008 01. Отчетный документ D3(D3.7.9). Консорциум ГП НИИСК – ИПБ АЭС НАН Украины, 2010.

М. Б. Старіков, А. М. Алфьоров, М. І. Панасюк, І. А Литвин, Є. П. Люшня

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МІГРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ У ЗОНІ АЕРАЦІЇ НА ПРОММАЙДАНЧИКУ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

Виконано прогноз міграції ^{90}Sr в результаті вологопереносу в зоні аерації малої потужності, під впливом атмосферних опадів в умовах будівництва котловану південної стрічки фундаменту нового безпечного конфайнмента. Прогноз виконано методом математичного моделювання за допомогою спеціальної програми, що вирішує систему диференційних рівнянь, які описують процес волого- та масопереносу в ґрунтах із недостачею насичення.

Ключові слова: математичне моделювання, міграція радіонуклідів, зона аерації, коефіцієнт розподілу.

N. B. Starikov, A. M. Alfyorov, M. I. Panasyuk, I. A. Lytvyn, E. P. Liushnya

SIMULATION OF MIGRATION OF RADIONUCLIDES IN THE ZONE OF AERATION AT THE INDUSTRIAL SITE OF THE “UKRYTTYA” OBJECT

Completed forecast migration of ^{90}Sr in unsaturated zone, under the influence of rainfall in a southern strip of construction excavation foundation of the NSC. Forecast made by mathematical modeling using a special program solves a system of differential equations describing the mass transfer of moisture in the soil of incomplete water saturation

Keywords: mathematical modeling, the migration of radionuclides, the zone of aeration, the distribution coefficient.

Поступила в редакцию 07.06.11