

пробег электронов r_0 зависимости основных характеристик e, X -излучения, индуцированного в материалах с широким диапазоном значений атомного номера $Z = 7—73$ и энергии электронов $E_0 = 5—100$ МэВ, существенно унифицируются. Это открывает возможность простой оценки радиационных характеристик выходных устройств ускорителя и их оптимального размещения. В частности, при тормозной длине тракта 0,5—0,6 единицы тормозной толщины обеспечивается максимум коэффициента конверсии. Однако в этом случае энергия электронного компонента составляет 20—25% начальной. Поэтому желательна предварительная очистка выходящего из конвертера излучения магнитным полем. Если очищающего магнита нет, но требуется минимальное присутствие электронов в тормозном излучении, то длину тракта следует увеличить до 1,2—1,4 единицы тормозной толщины. При этом достигается максимум коэффициента вторичного излучения с содержанием электронного компонента 1% и менее, однако снижается поток энергии фотонов до 0,5—0,6 своего максимального значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пикаев А.К. Современное состояние радиационной технологии. — Успехи химии, 1995, т. 64, вып. 6, с. 609—639.
2. Бурмистенко Ю.Н. Фотоядерный анализ состава вещества. М.: Энергоатомиздат, 1986. 200 с.
3. Флеров Г.Н., Оганесян Ю.Ц., Белов А.Г., Стародуб Г.Я. Получение короткоживущего изотопа ^{123}I на микротроне МТ-22. — Атомная энергия, 1986, т. 61, вып. 4, с. 289—291.

4. Dovbnya A.N., Nikiforov V.I., Uvarov V.L., Zhyglo V.F. Optimization of electron linac operating conditions for photonuclear isotope production. — In: Proc. 11 Europ. Part. Accel. Conf. EPAC'08. Genova, Italy, June 23—27, 2008, p. 1308—1310.
5. Koscielniak S., Bricault P., Davids B. e.a. Proposal for a 1/2 MW electron linac for rare isotope and material science. — Ibid, p. 985—987.
6. Дикий Н.П., Дедик А.Н., Довбня А.Н. и др. Особенности высокотемпературной диффузии в бетоне 4-го блока Чернобыльской АЭС. — Радиохимия, 2007, т. 49, № 4, с. 373—377.
7. Dovbnya A.N., Dikiy N.P., Sayenko S.Yu., Uvarov V.L. Electron linacs in radioactive waste disposal problem. — In: Proc. Part. Accel. Conf. PAC'2001. Chicago, USA, June 18—22, 2001, p. 2805—2807.
8. Gohar Y., Bolshinsky I., Naberezhnev D. e.a. Accelerator-driven subcritical facility: conceptual design development. — Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A, 2006, v. 562, p. 870—874.
9. Salvat F., Fernandez-Varea J.M., Sempau J. PENELOPE-2006 a Code System for Monte-Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. OECD NEA, Issy-les-Moulineaux, France, 2006.
10. Радиационная дозиметрия: электронные пучки с энергиями от 1 до 50 МэВ. Доклад 35 МКРЕ. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
11. Комар А.П., Круглов С.П., Лопатин И.В. Измерение полной энергии пучков тормозного излучения от электронных ускорителей. Л.: Наука, 1972. 174 с.
12. Довбня А.Н., Айзацкий Н.И., Борискин В.Н. и др. Параметры линейного ускорителя электронов 10-см диапазона на энергию 30...100 МэВ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования, 2006, № 2(46), с. 11—13.

Поступила в Редакцию 4.12.08

УДК 621.039.7

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ^{90}Sr ДЛЯ ПЛОЩАДКИ СТАРЫХ ХРАНИЛИЩ РНЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Волкова Е.В. (РНЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Прогнозирование распространения радиоактивного загрязнения с подземными водами является важной задачей при реабилитации загрязненных территорий и оценке техногенного риска. На сегодняшний день существует множество программных пакетов для расчета переноса различных веществ в конкретных гидрогеологических условиях [1].

В 2002—2006 гг. в РНЦ «Курчатовский институт» была реабилитирована территория старых хранилищ радиоактивных отходов, сооруженных на спецплощадке в 1943—1974 гг. [2]. В процессе проведения этих работ была создана комбинированная численная модель фильтрации и переноса вещества с подземными водами в районе площадки для оценки миграции ^{90}Sr ,

прогнозирования распространения существующего ареала этого радионуклида на период до 25 лет (конец 2010 г.) для различных сценариев реабилитации и принятия дальнейших инженерных решений. Численная модель создана на базе программных кодов MODFLOW и MT3DMS, учитывала гидрогеологические и техногенные слои, соответствующих зонам с различными геологическими свойствами.

Разработанная численная модель и полученный с ее помощью прогноз распространения ^{90}Sr описаны в работе [3] и поэтому не приводятся в настоящей статье.

Несмотря на удовлетворительное качество построенной модели и полученных с ее помощью оценок, прогноз был подвержен неопределенности, обусловленной упрощенной дискретизацией параметров, неточностями входных параметров, погрешностями измерений и прочими причинами. Это потребовало провести локальный и глобальный анализ чувствительности численной модели в целях внесения рекомендаций по ее дальнейшей калибровке и организации эффективной сети наблюдательных скважин на площадке. Полученные результаты и сделанные на их основе выводы изложены в настоящей статье.

Особенности анализа чувствительности численных моделей. Численное моделирование всегда сопряжено с погрешностями, вносящими вклад в суммарную погрешность, оценка которой является важным этапом моделирования. Одним из подходов для оценки погрешности и определения чувствительности полученных результатов к входным параметрам является статистический анализ численных моделей, который применяют в ядерной энергетике, экономике, электротехнике и др. [4]. Особенно активно анализ чувствительности распространен в прикладных задачах изучения влияния техногенных систем на окружающую среду, оценки их риска и надежности.

Анализ чувствительности включает в себя различные методики обработки экспериментальных данных и входных параметров численных моделей, которые могут быть основаны на детерминистском или вероятностном подходе, а также рассматривать модель как локально, так и глобально. Среди подходов выделяют три основных: распространение погрешностей, локальный и глобальный анализ чувствительности.

особенности площадки старых хранилищ и позволяла осуществлять трехмерное моделирование конвективно-дисперсионного переноса радиоактивного загрязнения с исследуемой территории с учетом распада и сорбции радионуклидов. Пространственная дискретизация области моделирования включала семь модельных

Методика распространения погрешности позволяет найти интервалы возможных значений выходных параметров модели, соответствующие вариациям входных параметров.

Локальный анализ чувствительности изучает влияние локальных возмущений входных параметров модели вокруг некоторого начального набора значений на результат модельного расчета. Такой анализ позволяет:

сравнить чувствительность модельного прогноза к различным входным параметрам модели, что позволяет увидеть, какие параметры нужно уточнять для эффективного снижения погрешности прогноза;

построить карты чувствительности, по которым можно найти возможное местоположение новых скважин. Измерения в таких скважинах могут дать наиболее полную информацию для уточнения параметров и калибровки модели.

Отбор проб в точках области моделирования с высокой чувствительностью к входным параметрам помогает уточнить эти параметры и, следовательно, снизить погрешность прогноза. Это один из важных факторов, принимаемый во внимание при создании эффективных сетей скважин контроля.

Глобальный анализ чувствительности [5] рассматривает входные параметры модели во всей области их возможного изменения и изучает, какая часть вариации результата обусловлена тем или иным входным параметром или той или иной группой параметров. Глобальный анализ чувствительности позволяет определить [6]:

соответствие модели анализируемому процессу;

параметры модели, вносящие наибольший вклад в дисперсию модельного результата;

параметры, наименьшим образом влияющие на вариацию результата;

коррелирующие параметры или группы параметров.

На практике вычисление индексов чувствительности связано с большим числом повторений модельных расчетов, что часто бывает неосуществимо из-за значительных временных

затрат. В этом случае для вычислений можно использовать поверхности отклика — так называемые метамоделли, которые моделируют статистическое поведение численной модели на основе некоторого имеющегося количества вычисленных значений.

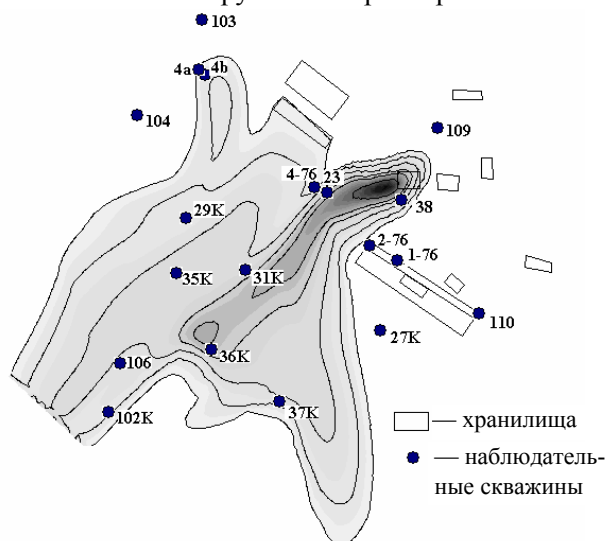
Локальный анализ чувствительности.

Локальный анализ чувствительности численной модели для площадки старых хранилищ РНЦ «Курчатовский институт» был проведен в несколько этапов. Сначала была определена чувствительность модельного прогноза к выбранным параметрам в отдельный момент времени. Затем входные параметры были отсортированы по степени влияния на прогнозную концентрацию и вычислены ковариационная матрица и корреляции параметров.

Для выбранного момента времени была вычислена чувствительность к семи входным параметрам модели, описывающим интенсивность источников загрязнения, длину периода действия источников загрязнения и коэффициент сорбционного распределения ^{90}Sr . При этом для каждого анализируемого параметра модельный расчет был выполнен с измененным на 1% значением этого параметра.

Анализ показал, что все параметры, кроме коэффициента распределения, влияют на концентрацию ^{90}Sr только положительным образом: большим значениям параметров соответствуют большие прогнозные значения концентрации.

На рис. 1 темному цвету соответствуют зоны с наибольшей суммарной чувствительностью по семи анализируемым параметрам. Располо-



Р и с. 1. Суммарная чувствительность численной модели для площадки старых хранилищ РНЦ «Курчатовский институт»

жение новых наблюдательных скважин в этих зонах наиболее информативно с точки зрения уточнения указанных параметров и соответствующей калибровки модели.

На основе вычисленной чувствительности параметры были отсортированы по степени влияния на прогноз. Наибольшую чувствительность модель проявила к концентрации одного из источников загрязнения (одного из старых хранилищ) и длительности периода его действия.

На основе полученных данных для семи исследуемых параметров была определена корреляция между анализируемыми параметрами. Вычисления показали, что корреляция существует между парами параметров, отвечающих за интенсивность источника и длительность периода его действия, что согласуется с физическим описанием моделируемого процесса — увеличение концентрации источника в течение данного периода и длительности периода действует на выходную концентрацию подобным образом. Это означает, что при дальнейшей калибровке модели нет смысла пытаться одновременно уточнять параметры из коррелирующих пар — их следует объединить в группы и калибровать лишь по одному параметру из группы. Анализ не выявил корреляций, не соответствующих физическому описанию процесса.

Глобальный анализ чувствительности.

Для глобального анализа чувствительности было выбрано 17 входных параметров модели, описывающих коэффициент фильтрации различных зон и слоев модели, коэффициент сорбционного распределения ^{90}Sr в разных слоях модели, интенсивность инфильтрационного питания различных зон площадки и источников загрязнения. Указанный набор входных параметров был определен на основе общих соображений влияния на прогнозируемую концентрацию. Кроме того, представлялось целесообразным включить в анализ все входные параметры, рассмотренные на этапе локального анализа чувствительности, чтобы затем сравнить результаты. Входные параметры, включенные в анализ, их модельные значения и рассматриваемые интервалы возможного изменения приведены в табл. 1.

В качестве выходных параметров взяты интегральные характеристики прогнозируемого моделью ареала загрязнения — площадь части ареала с концентрацией ^{90}Sr более 1 Бк/л для

Таблица 1. Входные параметры для глобального анализа чувствительности модели

Параметр	Начальное значение	Распределение	Параметры	Источник
Коэффициент фильтрации модельного слоя, м/сут:				
слой 2	8	Вейбулл	2,08, 5,33	Гистограмма
3	15	»	1,646, 5,72	»
4	8	»	1,682, 4,245	»
5	0,0001	Треугольное	0—0,0003	Экспертно
6	3	Вейбулл	2,35, 3,48	Гистограмма
Коэффициент распределения модельного слоя, л/кг:				
слой 2	3	Треугольное	0,01—12	Эксперименты
3	0,2	»	0,01—12	»
4	3	»	0,01—12	»
5	10	»	2,2—25,8	»
6	2,4	»	0,01—12	»
Инфильтрационное питание зоны модели, мм/сут:				
зона 1	0,04—0,08	Равномерное	0,04 ± 0,01	Анализ данных
2	0,5—10	»	1,2 ± 0,8	»
3	10—100	»	34 ± 7	»
4	100—200	»	122 ± 40	»
Интенсивность источника загрязнения, Бк/сут:				
источник 1	3000	Треугольное	2400—3600	Экспертно
2	30 000	»	24 000—36 000	>>
3	30 000	»	24 000—36 000	>>

верхнего и более 0,01 Бк/л для нижнего горизонта. Такой выбор выходных параметров анализа объясняется относительной простотой вычисления этих характеристик, их наглядностью, а также тем, что они описывают прогнозируемый ареал в целом и в меньшей степени подвержены ошибкам моделирования, чем локальные характеристики, такие, как, например, прогнозируемая концентрация в отдельных точках.

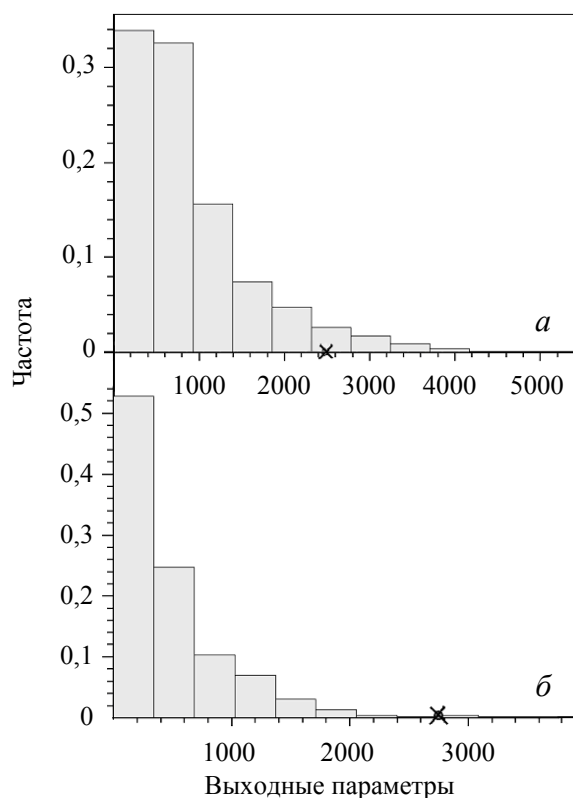
Каждый входной параметр проанализирован для выбора интервала его возможного изменения и функции распределения вероятности на этом интервале. На основе выбранных интервалов и распределений вероятности методом Монте-Карло было сформировано 230 вариантов наборов входных параметров. Такое число экспериментов обусловлено двумя соображениями: с одной стороны, оно достаточно для представления статистических свойств выбранных функций распределения вероятности, с другой, время вычислений мало.

Для автоматизации циклических вычислений разработана специальная программа на языке C++, которая на каждой итерации считывает

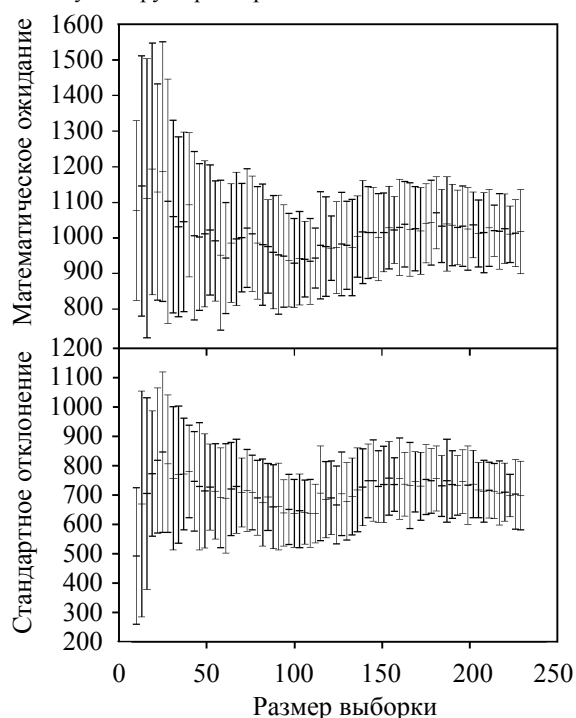
набор входных параметров, создает соответствующие входные файлы для вычислительных модулей MODFLOW и MT3DMS, выполняет расчет и сохраняет прогнозную концентрацию. В общей сложности выполнено 230 итераций, что заняло около 44 ч машинного времени на персональном компьютере с процессором Pentium 4.

Как видно на рис. 2, выходные параметры имеют распределение, близкое к экспоненциальному. Значения, соответствующиеначальному набору входных параметров, лежат в хвосте соответствующих распределений, т.е. им соответствуют относительно небольшие вероятности. Такой результат указывает на то, что ареал распространения загрязнения в среднем может быть меньше прогнозируемого моделью изначально. Коэффициент корреляции, вычисленный для выходных параметров, составил 0,247, что говорит о низкой связи между ними.

Для проверки репрезентативности полученной выборки из 230 выходных параметров была проанализирована сходимость эмпирических среднего и стандартного отклонения и их дове-



Р и с. 2. Площадь ареала в верхнем (а) и нижнем водоносном горизонте (б): × — значение, соответствующее начальному набору параметров



Р и с. 3. Сходимость эмпирических значений среднего, стандартного отклонения и их доверительных интервалов для площади ареала загрязнения в нижнем водоносном горизонте (каждый вертикальный отрезок представляет среднее ± 2 * стандартное отклонение для данного размера выборки)

рительных интервалов (рис. 3). Анализ подтвер-

дил, что для обоих выходных параметров количество значений достаточно репрезентативно, так как графики сходятся к соответствующим средним и стандартным отклонениям и их отклонения незначительны, начиная с некоторого числа.

Для полученных выборок входных и выходных параметров был вычислен индекс чувствительности (табл. 2). Так как меру линейности модели не вычисляли, то индексы в табл. 2 имеют лишь качественный смысл — они позволяют определить список наиболее влиятельных параметров для данного выходного параметра.

Т а б л и ц а 2. Индекс чувствительности в рамках линейной модели (корень квадратный из коэффициента частного коэффициента корреляции $\times 10^2$)

Входной параметр	Площадь ареала загрязнения в водоносном горизонте	
	верхнем	нижнем
Коэффициент фильтрации модельного слоя, м/сут:		
слой 2	39	28
3	67	21
4	31	64
5	20	52
6	13	45
Коэффициент распределения модельного слоя, л/кг:		
слой 2	20	18
3	80	42
4	17	50
5	16	50
6	16	72
Инфильтрационное питание зоны модели, мм/сут:		
зона 1	22	33
2	11	17
3	25	8
4	37	11
Интенсивность источника загрязнения, Бк/сут:		
источник 1	19	37
2	12	20
3	23	9

Согласно индексам чувствительности, параметрами, вносящими наибольший вклад в погрешность при определении площади ареала загрязнения в верхнем водоносном горизонте, яв-

ляются коэффициенты фильтрации и распределения третьего слоя модели, а также интенсивность инфильтрационного питания в зоне сильных утечек из трубопровода и коэффициенты фильтрации второго и четвертого слоев модели. Наиболее влиятельным параметром для площади ареала загрязнения в нижнем водоносном горизонте является коэффициент распределения, заданный в четвертом, пятом и шестом слоях модели, а также коэффициент фильтрации четвертого и пятого слоев модели.

Таким образом, результаты анализа показали, что при дальнейшей калибровке численной модели следует в первую очередь сосредоточить внимание на уточнении коэффициентов распределения, фильтрации и интенсивности инфильтрационного питания в зонах его повышенных значений. Это позволит более эффективно калибровать модель и в итоге значительно уточнить прогнозные площади распространения ареала загрязнения.

Заключение. Анализ чувствительности численной модели позволил выявить наиболее влиятельные входные параметры в локальном и глобальном смысле, рассчитать показатели чувствительности, коэффициентов корреляции между входными параметрами и построить карты локальной чувствительности прогноза к отдельным входным параметрам модели.

Исследование позволило скорректировать процесс дальнейшей калибровки численной модели. Кроме того, на основе построенных карт локальной чувствительности внесены рекомендации по планированию эффективной сети наблюдательных скважин для постреабилизационного контроля на площадке. Анализ под-

твердил корректность созданной прогнозной численной модели.

Помимо этого, использованная методика анализа позволила сделать вывод, что прогноз распространения загрязнения, рассчитанный ранее с помощью модели, является пессимистичным, т.е. более вероятно, что распространение ареала загрязнения будет меньше прогнозируемого ранее как для верхнего, так и для нижнего водоносного горизонта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mook W., Yurtsever Y. Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications. V. VI: Modelling. Paris: UNESCO Publishing, 2001.
2. Велихов Е.П., Пономарев-Степной Н.Н., Волков В.Г. и др. Реабилитация радиоактивно-загрязненных объектов и территории РНЦ «Курчатовский институт». — Атомная энергия, 2007, т. 102, вып. 5, с. 300—306.
3. Волков В.Г., Волкова Е.В., Расторгуев И.А. и др. Моделирование переноса радиоактивного загрязнения подземными водами при реабилитации площадки старых хранилищ РНЦ «Курчатовский институт». — Там же, 2008, т. 104, вып. 2, с. 115—118.
4. Saltelli A., Chan K., Scott E. (Eds.) Sensitivity Analysis. N.Y.: Wiley Series in Probability and Statistics, 2000.
5. Соболев И.М. Об оценке чувствительности нелинейных математических моделей. — Мат. модел., 1990, т. 2, вып. 1, с. 112—118.
6. Iooss B., van Dorpe F., Devictor N. Response surfaces and sensitivity analysis for an environmental model of dose calculations. — Reliability Engng System Safety, 2006, v. 91, p. 1241—1251.

Поступила в Редакцию 22.10.08

Рефераты статей

621.039.5

Городков С.С., Калугин М.А. **Вычисление методом Монте-Карло коэффициента диффузии ячеек ядерных реакторов.** — Атомная энергия, 2009, т. 106, вып. 4, с. 183—188.

Метод Монте-Карло можно успешно применять для вычисления средних сечений ячеек реакторов, однако его использование для расчета коэффициентов диффузии наталкивается на сложности. В настоящей работе предлагается новый алгоритм вычисления этих коэффициентов, основанный на последовательном использовании метода среднеквадратичных пробегов. Предлагаемый алгоритм можно применять для вычисления коэффициентов диффузии в произвольных сегментах ядерных реакторов, он не налагает ограничений на детальность описания геометрии,

зависимости сечений от энергии либо анизотропии рассеяния нейтронов ядрами среды. Рис. 5, список лит. 5 назв.

УДК 621.039.542

Поролло С.И., Конобеев Ю.В., Шуленин С.В. **Анализ поведения оболочек твэлов БН-600 из стали 0X16H15M3BP при высоком выгорании топлива.** — Атомная энергия, 2009, т. 106, вып. 4, с. 188—195.

Проведены послереакторные исследования оболочек твэлов БН-600, изготовленных из стали 0X16H15M3BP, после облучения до максимального выгорания 10% тяж. ат. и выше. Показано, что наибольшая деградация эксплуатационных свойств оболочек твэлов наблюдается в зоне максимального увеличения их диаметра и выражается в полном охрупчивании материала оболочки и появлении на внутренней поверхности трещин значительной глубины.