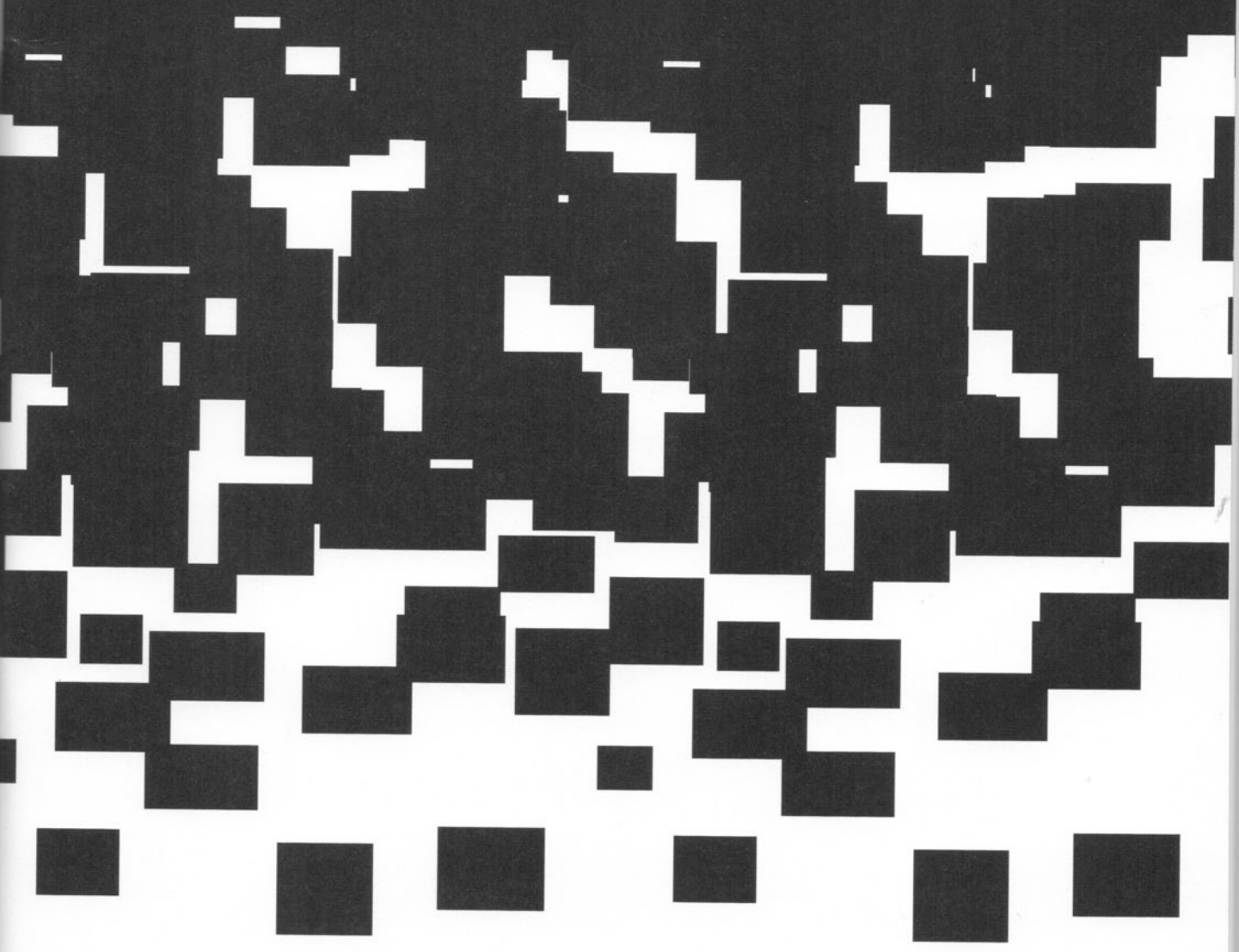


ISSN 1816-9643

ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ 2012 № 2



ЖУРНАЛ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ "МАЯК"

ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Научно-практический журнал
ФГУП «ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «МАЯК»
Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»

Издается с 1996 г., периодичность – 4 номера в год
№ 2 (66) 2012 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР Ю.Г. МОКРОВ
ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА И.Г. ТАНАНАЕВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Е.Н. Аврорин, В.В. Адушкин, Р.М. Алексахин, С.В. Баранов, В.Н. Большаков,
В.И. Величкин, Л.А. Ильин, Н.П. Лавёров, Б.Ф. Мясоедов, В.И. Осипов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.В. Аклеев, Г.Ш. Баторшин, И.А. Иванов, С.Н. Калмыков,
Н.А. Кошурникова, И.И. Линге, М.В. Логунов, В.П. Медведев, С.А. Романов,
Е.А. Демченко (отв. секретарь), В.Ф. Хохряков, В.В. Хохряков

СОДЕРЖАНИЕ

1. РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

- Бастриков В.В., Хохряков В.В., Жуковский М.В. Моделирование спонтанного распыления радионуклидов с поверхности частиц диоксида плутония 3
- Шафикова С.Н., Шафиков Д.Н., Белозуб А.Н. Оценка применимости современных мощных средств для целей дезактивации 11
- Королёв В.А., Мищенко Ю.Н., Пузакова Г.Н., Тихонова Н.И., Шмидт О.В. Материалы на основе оксидов металлов и жидкого стекла для хранения или изоляции РАО. I. Прочностные характеристики 19
- Лызлова Е.В., Глухова А.В., Рамазанов Л.М. Изучение возможности извлечения урана из азотнокислых регенерационных растворов с применением новых катионитов 24
- Истомин И.А., Степанов С.В., Занора Ю.А., Красный Б.Л. Исследования свойств пористых керамических материалов применительно к очистке газоаэрозольных выбросов радиохимических предприятий 31
- Носкова Л.М., Шуктомова И.И., Кудяшева А.Г. Оценка процессов долговременной миграции и аккумуляции естественных радионуклидов в компонентах наземных экосистем в районе бывшего радиевого производства 36
- Козлов П.В., Ремизов М.Б., Дементьева И.И., Орлова В.А., Галузин Д.Д., Алой А.С., Коварская Е.Н., Павлова Н.М. Влияние параметров нейтрализации осветленной фазы ёмкостей-хранилищ накопленных ВАО на свойства образующихся суспензий. Часть 2. Карбонизация 49

СОДЕРЖАНИЕ

2. ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

| | |
|--|----|
| Белкин Д.Ю., Ядрышников М.А., Боронин В.В., Цвелев М.П., Елагина В.Г., Тихоновский В.Л. Создание информационной системы вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов ФГУП "ПО "Маяк" | 60 |
|--|----|

3. ОБЛУЧЕНИЕ И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

| | |
|---|----|
| Мартиненко И.А., Сокольников М.Э. Относительный риск заболевания раком щитовидной железы у жителей двух районов ЗАТО г. Озёрск | 66 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Григорьева Л.И., Томилин Ю.А. Оценка и прогноз радиационной нагрузки на работников гранитных карьеров от техногенно-усиленных источников природного происхождения | 72 |
|--|----|

4. ИНФОРМАЦИЯ И ПЕРСОНАЛИИ

| | |
|--|----|
| Всероссийское рабочее совещание "Торий-2012" | 81 |
|--|----|

| | |
|-------------|----|
| Новые книги | 82 |
|-------------|----|

| | |
|-----------------|-----------|
| CONTENTS | 83 |
|-----------------|-----------|

| | |
|------------------|-----------|
| ABSTRACTS | 85 |
|------------------|-----------|

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| Сведения об авторах статей | 89 |
|-----------------------------------|-----------|

Журнал включен в перечень ВАК научных журналов и изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

УДК 546.798.22

© 2012

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОНТАННОГО РАСПЫЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ С ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА ПЛУТОНИЯ

В.В. Бастриков, М.В. Жуковский

Россия, г. Екатеринбург, Институт промышленной экологии УрО РАН

В.В. Хохряков

Россия, г. Озёрск, ФГУП Южно-Уральский Институт биофизики

Методом имитационного моделирования (метод Монте-Карло) проведено теоретическое исследование процессов спонтанного вылета (распыления) частиц вещества из диоксида плутония вследствие радиоактивного распада радионуклидов в нём. Выход распыления для ядер плутония составил $3,40 \cdot 10^5$ част. \cdot см⁻² \cdot с⁻¹, для ядер кислорода – $1,11 \cdot 10^6$ част. \cdot см⁻² \cdot с⁻¹. Средняя энергия распыляемых частиц составила 366 эВ для ядер плутония и 120 эВ для ядер кислорода. Показано, что основную неопределённость в полученное значение выхода распыления вносит величина энергии поверхностной связи для элементов, входящих в состав вещества. Образование альфа-частиц в веществе не даёт существенного вклада в поверхностное распыление частиц, и оно целиком обусловлено воздействием тяжелых ядер отдачи урана.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПЛУТОНИЙ, РАСПЫЛЕНИЕ, МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО, РАДИОАКТИВНЫЕ АЭРОЗОЛИ

Актуальность изучения процессов самопроизвольного вылета (распыления) радионуклидов из вещества связана с необходимостью обеспечения радиационной безопасности лиц, работающих на предприятиях по переработке или хранению радиоактивных материалов. Вследствие спонтанных процессов такие материалы могут являться постоянными источниками распыления радиоактивных частиц в окружающую среду. В радиоактивных атмосферных аэрозолях, депонированных в легких, энергия радиоактивного распада может также способствовать выходу радиоактивных атомов из аэрозольных частиц и перемещению в другие органы или отделы живого организма. Знание и оценка вероятности подобных процессов крайне важны для адекватной оценки совокупной дозы облучения персонала, которая за счёт облучаемых в данной работе процессов, может быть существенно недооценена при рутинной индивидуальной дозиметрии.

Несмотря на то, что эффекты спонтанного распыления радионуклидов из твердых образцов наблюдались ещё в самых ранних ис-

следованиях радиоактивности, процессы, формирующие данные эффекты мало исследованы. По теме распыления плутония существуют лишь единичные публикации, хотя несомненно, загрязнение воздуха рабочих помещений предприятий ЯТЦ нанометровыми частицами плутония может создать значительный ущерб для здоровья как профессиональных работников, так и для населения в целом.

Основной задачей данной работы явилось моделирование процессов прохождения, взаимодействия и вылета ядер отдачи в плутонийсодержащих материалах, а также теоретический расчёт траекторий прохождения частиц, профилей распределения частиц в веществе и энергетически-углового распределения частиц вещества, вылетающих с внешней поверхности.

Результаты исследований в виде имитационной модели и численных теоретических оценок планируется использовать для дальнейшего изучения образования промышленных альфа-излучающих аэрозолей и загрязнения воздуха рабочих помещений предприятий ЯТЦ

нанометровыми частицами плутония, а также для совершенствования методов дозиметрии внутреннего облучения профессиональных работников. Результаты данной работы могут быть также использованы для анализа и оценки распыления других радиационноопасных элементов из радиоактивных образцов различной природы.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методика моделирования, реализованная в данной работе, основывается на математическом расчёте траекторий прохождения ядер в веществе методом Монте-Карло (метод статистических испытаний) на базе современных моделей и представлений о процессах ядерного и электронного торможения ионов в веществе. Компьютерное моделирование процессов торможения и рассеяния энергетических ионов в веществах широко используется для изучения ионной имплантации, радиационных дефектов, распыления, обратного рассеяния и прохождения ионов через объект. Метод Монте-Карло имеет ряд явных преимуществ в сравнении с аналитической разработкой теории переноса. Он позволяет строго решать задачи упругого рассеяния, явно учитывать поверхности и разделы сред, легко определять энергетические и угловые распределения. Основное ограничение данного метода состоит в том, что он в своей основе является времязатратным. Соответственно, всегда существует конфликт между затрачиваемым компьютерным временем и желаемой статистической точностью. Общее число теоретических имитационных экспериментов, поставленных в рамках данной работы, составило 120 с числом независимых индивидуальных историй событий по 10000 в каждом (суммарное число рассмотренных историй событий – 1200000).

Стартовым событием в задаче, изучаемой в данной работе, является спонтанный радиоактивный альфа-распад ядер плутония, содержащихся в веществе. При распаде изотопа ^{239}Pu образуются альфа-частица и ядро ^{235}U , получающие энергии 5,15 МэВ и 87,7 кэВ, соответственно. Дальнейшие процессы связаны с движением альфа-частиц и ядер урана данных начальных энергий внутри вещества. Каждая

история событий, рассматриваемая в работе, начинается с задания движущейся частице соответствующей начальной энергии, случайного положения внутри объекта (равномерное распределение по объёму вещества) и случайного направления движения (изотропность). Далее предполагается, что частица меняет направление в результате бинарных ядерных столкновений и движется по прямым свободным траекториям между столкновениями. Энергия снижается в результате ядерных (упругих) и электронных (неупругих) энергетических потерь, и история завершается либо когда энергия упадет ниже предопределенного значения, либо когда положение частицы окажется вне мишени. Мишень рассматривается как аморфный объект со случайным расположением атомов, то есть направленные свойства кристаллических решеток игнорируются. Данный метод применим к широкому диапазону энергий падающих частиц от примерно 0,1 кэВ/аеи до нескольких МэВ/аеи, в зависимости от масс участвующих частиц. Нижний предел обусловлен рассмотрением только бинарных столкновений, а верхний – исключением из рассмотрения ядерных реакций и релятивистского эффекта. Процессы ядерного и электронного торможения рассматриваются независимо. Так, частицы теряют энергию дискретно при ядерных столкновениях и непрерывно за счёт электронного взаимодействия.

Для расчета характеристик взаимодействия движущихся энергетических частиц с веществом использовался программный пакет SRIM-2010 [1]. Данный пакет является известным и авторитетным в мировом научном сообществе инструментом для проведения теоретических вычислений, связанных с взаимодействием энергетических ионов с веществом. В пакете SRIM-2010 воплощены самые современные теоретические представления о строении вещества и процессах взаимодействия частиц, которые эмпирически увязаны с данными многочисленных экспериментальных исследований. Подробное описание научных основ и концепций, заложенных в программном пакете, представлено в [2].

В результате расчётов получены профили распределения ядер отдачи в веществе, распределения энергетических потерь ядер на образование вакансий и смещений, энергетиче-

ские и пространственные распределения ядер, покидающих исходный образец с внешней поверхности.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОДУКТОВ РАСПАДА ПЛУТОНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

При распаде плутония в диоксиде образуются энергетические частицы – ядра гелия (альфа-частицы) и ядра отдачи урана. На рис. 1 показаны распределения пробегов данных частиц по глубине вещества, полученные в ходе теоретического моделирования. Графики получены в предположении нормального падения альфа-частиц и ядер отдачи урана соответствующих энергий на образец диоксида плутония. По оси ординат отложены значения образуемого при этом удельного содержания прошедших частиц (атомов на см^3) внутри образца на единицу флюенса падающих частиц (атомов на см^2). Траектории альфа-частиц (рис. 1а) являются прямолинейными с малым разбросом по длине пробега и с крайне редкими значительными отклонениями от начального направления движения. Средний пробег составляет 11,4 мкм (страгглинг 0,523 мкм), средний сдвиг частиц в плоскости, перпендикулярной направлению движения составляет 0,706 мкм (страгглинг 0,964 мкм). Траектории ядер урана (рис. 1б), напротив, имеют значительный разброс

как по длине пробега, так и по отклонению от начального направления движения. Средний пробег составляет 155 А (страгглинг 73 А), средний сдвиг в поперечной плоскости 49 А (страгглинг 62 А). При этом пробег отдельных частиц может достигать значений порядка 500 А.

Ядра гелия и урана передают свою энергию ядрам вещества (вторичным ядрам отдачи) также различным образом (рис. 2). Передача энергии альфа-частиц (рис. 2а) незначительна вдоль всего пути частицы за исключением концевой части, в которой потери энергии существенно возрастают. При этом средняя энергия, передаваемая одной альфа-частицей всем ядрам отдачи на своём пути, составляет 7,28 кэВ для ядер отдачи плутония и 4,82 кэВ для ядер отдачи кислорода. Передача энергии ядер урана (рис. 2б) максимальна в начале пути и практически монотонно спадает до нуля в конце пути частицы. Средняя энергия, передаваемая ядром урана ядрам плутония, составляет 53,5 кэВ, а ядрам кислорода – 26,7 кэВ.

Ядра отдачи плутония и кислорода получают достаточную энергию для их смещения внутри вещества и передачи энергии другим ядрам, в результате чего формируются каскады смещения. На рис. 3 показаны результирующие профили распределения вторичных ядер отдачи, в одной системе координат для сравнения построены также профили распределения пер-

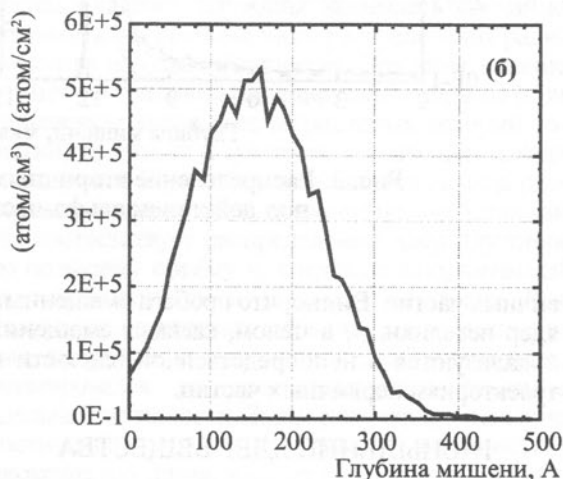
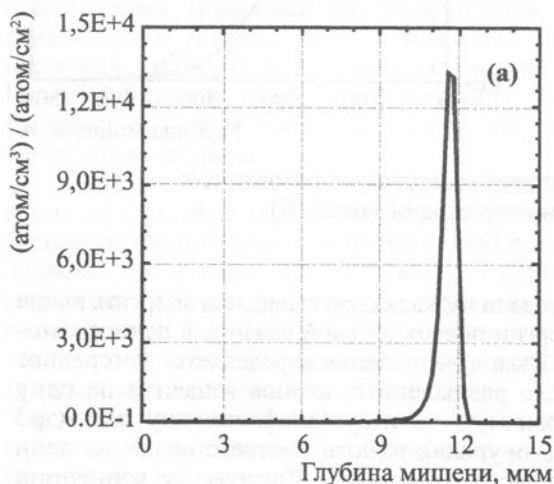


Рис. 1. Распределение длины пробега альфа-частиц (а) и ядер отдачи урана (б)

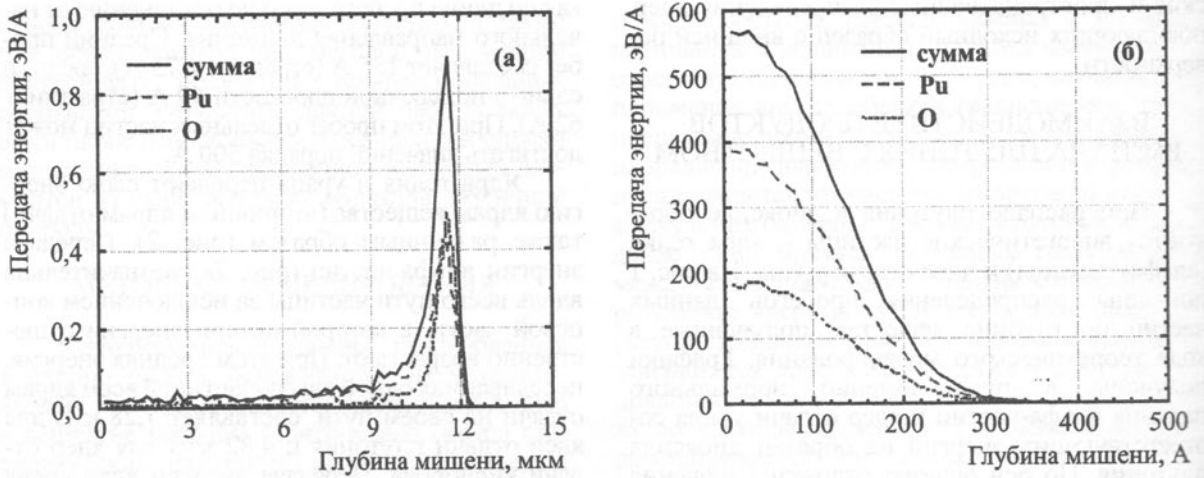


Рис. 2. Передача энергии альфа-частиц (а) и ядер отдачи урана (б) атомам вещества

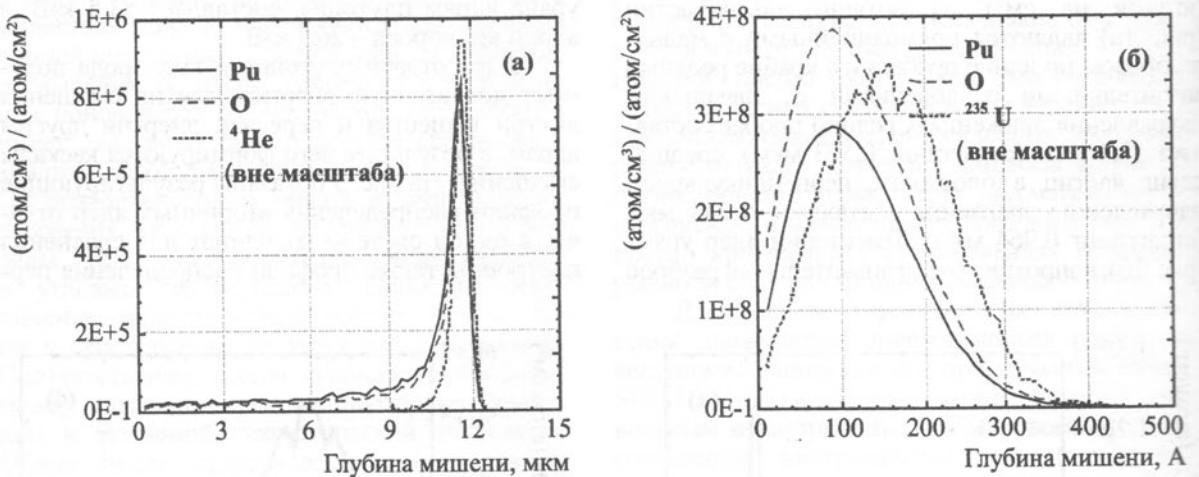


Рис. 3. Распределение вторичных ядер отдачи вещества, образованных под действием альфа-частиц (а) и ядер отдачи урана (б)

вичных частиц. Видно, что пробеги смещенных ядер невелики, и, в целом, каскады смещения локализуются в непосредственной близости к траекториям первичных частиц.

РАСПЫЛЕНИЕ ЯДЕР ВЕЩЕСТВА

Под распылением понимается вылет приповерхностных атомов из вещества за счёт

передачи им каскадом смещения энергии, выше энергии поверхностной связи для данного атома. Выход распыления определяется как среднее число распыленных атомов вещества на одну первичную частицу (альфа-частицу или ядро отдачи урана), то есть, соответственно, на один акт распада плутония. Физические концепции распыления представлены, например, в работах [3, 4].

Таблица 1

Основные результаты моделирования

| Распыляемая частица | Действие альфа-частиц | | Действие ядер отдачи урана | |
|---------------------|---|---------------------|---|---------------------|
| | Выход распыления, част./с·см ² | Средняя энергия, эВ | Выход распыления, част./с·см ² | Средняя энергия, эВ |
| Pu | $6,28 \cdot 10^4$ | 51,5 | $3,40 \cdot 10^5$ | 366 |
| O | $9,87 \cdot 10^4$ | 8,9 | $1,11 \cdot 10^6$ | 120 |
| всего | $1,62 \cdot 10^5$ | | $1,45 \cdot 10^6$ | |

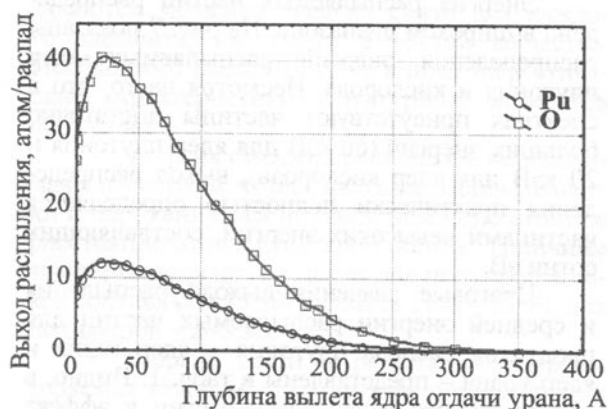


Рис. 4. Зависимость выхода распыления от глубины залегания радионуклида

Далее будет показано (табл. 1), что вклад альфа-частиц в распыление незначителен по сравнению с числом частиц вещества, распыляемых под действием ядер отдачи урана. Поэтому здесь и далее закономерности распыления рассматриваются с учётом эффекта только от ядер урана.

Вероятность распыления частиц вещества выше при распаде первичных ядер плутония, расположенных близко к внешней поверхности. Зависимость выхода распыления от глубины залегания распадающегося ядра плутония показана на рис. 4. Видно, что распыление происходит в основном при распаде ядер плутония, заглубленных на расстоянии не более 200–300 А от поверхности, а доминирующий вклад в распыление обусловлен распадом ядер на глубине порядка 20 А.

Для моделирования распыления частиц из объекта, соответствующего реальному образцу

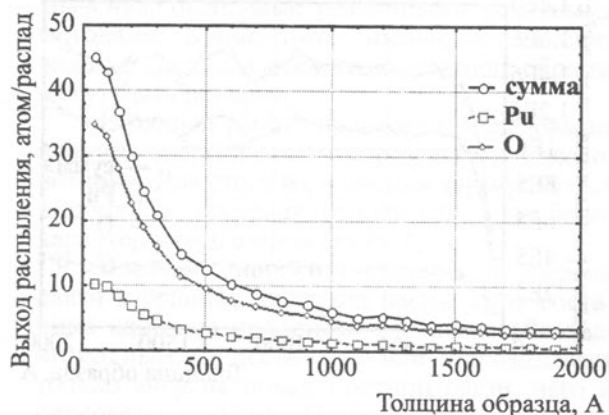


Рис. 5. Зависимость выхода распыления от толщины моделируемого образца

диоксида плутония, начальная глубина залегания распадающегося плутония задавалась случайно для имитации равномерного распределения радионуклида по объёму вещества. При этом задание различной толщины моделируемого образца (при одинаковом числе рассматриваемых историй событий) приводит к изменению значения выхода распыления. С увеличением толщины выход распыления падает, как это показано на рис. 5, так как это соответствует распределению ядер плутония по большему объёму и, следовательно, меньшей удельной активности диоксида плутония. Для получения адекватных значений выход распыления, полученный при разной толщине образца, нормировался на соответствующее значение удельной активности. Затем полученное значение соотносилось с реальной удельной активностью диоксида плутония, которая для соединения PuO_2 с плотностью $11,5 \text{ г/см}^3$ составляет $2 \cdot 10^{12} \text{ Бк/кг}$. Результирующая зависимость выхода распыле-

ния от толщины моделируемого образца показана на рис. 6.

Как видно, при толщине образца более 200–300 А, что соответствует средней длине пробега ядер урана в веществе, выход распыления выходит на насыщение и слабо изменяется вплоть до толщины образца около 1500 А. Начиная со значения 1500 А и более абсолют-

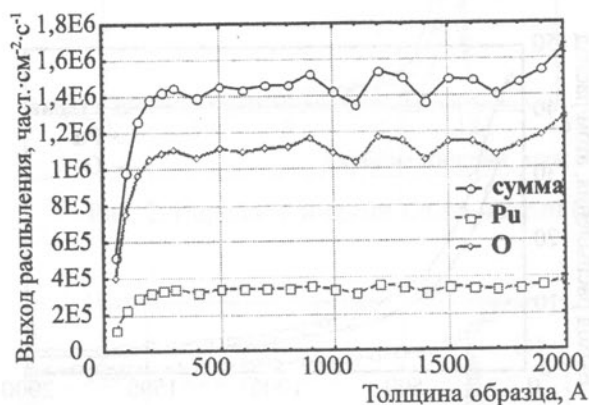


Рис. 6. Зависимость нормированного выхода распыления от толщины моделируемого образца

ное значение выхода распыления становится крайне малым, и статистическая точность существенно снижается, поэтому на рис. 6 в этой области появляется некоторый разброс относительно среднего значения. В целом имеем, что в широком диапазоне значений толщины образца (от 300 до 1500 А) результат моделирования остается представительным. Основные результаты моделирования, приведенные в табл. 1, получены усреднением по этому диапазону.

Энергия распыляемых частиц распределена в широком диапазоне. На рис. 7 показаны распределения энергий распыляемых ядер плутония и кислорода. Несмотря на то, что в спектрах присутствуют частицы достаточно больших энергий (60 кэВ для ядер плутония и 20 кэВ для ядер кислорода), выход распределения практически полностью определяется частицами невысоких энергий, составляющих сотни эВ.

Итоговые значения выхода распыления и средней энергии распыляемых частиц для продуктов распада плутония — ядер гелия и ядер урана — представлены в табл. 1. Видно, в частности, что вклад альфа-частиц в эффект распыления мал по сравнению эффектом ядер отдачи урана, и, кроме того, энергия распыляемых частиц также значительно ниже.

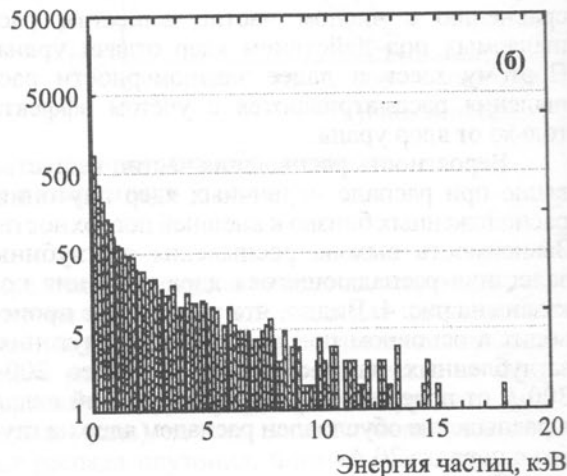
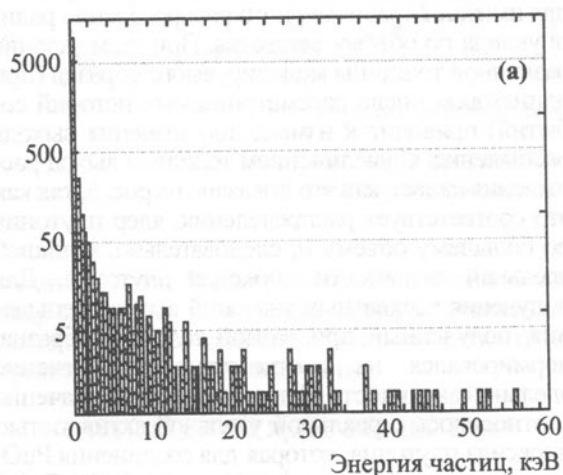


Рис. 7. Распределение энергии распыляемых ядер плутония (а) и кислорода (б)

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ СВЯЗИ АТОМОВ ВЕЩЕСТВА НА ВЫХОД РАСПЫЛЕНИЯ

При моделировании прохождения энергетических частиц через вещество и их взаимодействия с атомами вещества наряду с очевидными входными параметрами моделирования – элементный состав образца (атомный номер, атомный вес, стехиометрический коэффициент для каждого составного элемента), плотность, геометрические характеристики и т.п. – также задаются значения энергии связи для каждого элемента, входящего в состав вещества. Необходимо выделить следующие энергетические характеристики структурных элементов вещества:

- энергия смещения – энергия, необходимая ядру отдачи, чтобы преодолеть силы решетки и передвинуться на более чем одно атомное расстояние от исходного положения. Типичные значения энергии смещения для полупроводников составляют 15 эВ, для металлов – 25 эВ, для полимеров – 2–5 эВ.

- энергия связи в решетке – энергия, теряемая каждым ядром отдачи при смещении из исходного положения в решетке. Типичные значения – 1–3 эВ.

- энергия поверхностной связи – энергия, необходимая ядру вещества для покидания образца через внешнюю поверхность. Данный параметр является ключевым при оценке выхода распыления. Этот параметр не является традиционной химической энергией связи для поверхности атомов, но в данном случае учитывает также все нелинейности поверхности,

образованные, например, за счёт радиационных повреждений, поверхностной релаксации, шероховатости поверхности и т.п. Типичной удовлетворительной приближенной оценкой энергии поверхностной связи является энергия сублимации.

Данные параметры могут существенно влиять на значение выхода распыления. Экспериментальное определение этих параметров крайне затруднительно, и обычно при моделировании используются численные значения, оцененные различными условными методами. Кроме того, численные значения энергии связи для каждого конкретного образца могут быть разными.

В данной работе проведено исследование влияния энергии связи на результаты моделирования. Для этого их значения варьировались в широких пределах относительно наиболее характерного значения (табл. 2).

Влияние энергии смещения и энергии связи в решётке на выход распыления составило единицы процентов и оказалось незначительным. Существенное влияние оказывает только энергия поверхностной связи, чего и следовало ожидать. Однако данное влияние не является радикальным, и при разбросе значения величины в пределах $\pm 50\%$, изменение выхода распыления и энергии распыляемых частиц составляет менее 50%. Эти закономерности показаны на рис. 8 и 9. Таким образом, результаты моделирования, выполненные при средних значениях энергии связи, являются в достаточной степени достоверными и представительными.

Таблица 2

Диапазоны изменения значений энергии связи

| Энергия связи | Основное значение, эВ | Минимум, эВ | Максимум, эВ |
|-----------------------------|-----------------------|-------------|--------------|
| Плутоний | | | |
| энергия смещения | 25 | 12,5 | 37,5 |
| энергия связи в решётке | 3 | 1 | 5 |
| энергия поверхностной связи | 5,42 | 2,71 | 8,13 |
| Кислород | | | |
| энергия смещения | 28 | 14 | 42 |
| энергия связи в решётке | 3 | 1 | 5 |
| энергия поверхностной связи | 2 | 1 | 3 |

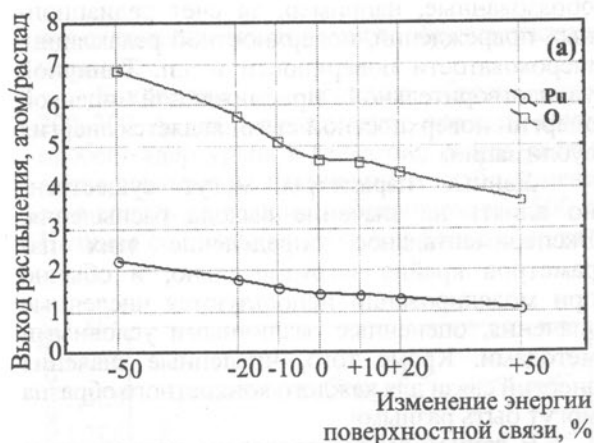


Рис. 8. Влияние энергии поверхностной связи на выход распыления

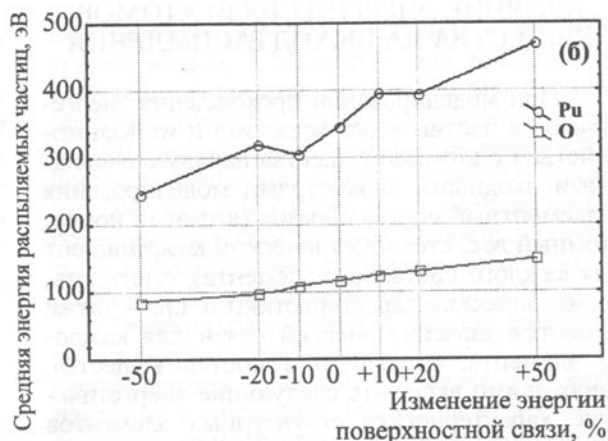


Рис. 9. Влияние энергии поверхностной связи на энергию распыляемых частиц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе методом имитационного моделирования (метод Монте-Карло) проведено теоретическое исследование процессов самопроизвольного вылета (распыления) частиц вещества из диоксида плутония вследствие радиоактивного распада радионуклидов в нём.

Выполнено моделирование процессов прохождения продуктов распада ядер плутония в веществе, передачи энергии атомам вещества, образования каскадов смещения и поверхностного распыления частиц вещества в окружающую среду. Показано, что прохождение альфа-частиц в веществе не даёт вклада в распыление, и оно целиком определяется воздействием тяжелых ядер отдачи урана.

Итоговая оценка основной исследуемой величины – выхода распыления – составила для соединения PuO_2 следующие величины:

- распыление ядер плутония $3,40 \cdot 10^5$ част. $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
- распыление ядер кислорода $1,11 \cdot 10^6$ част. $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Средняя энергия распыляемых частиц составила:

- 366 эВ для ядер плутония;
- 120 эВ для ядер кислорода.

Показано, что основное влияние на полученное значение выхода распыления оказывает величина энергии поверхностной связи для элементов, входящих в состав вещества. Так, изменение данной величины в пределах от -50% до $+50\%$ обуславливает изменение выхода распыления в диапазоне от $+50\%$ до -25% , соответственно. Значения других параметров существенного влияния на выход распыления не оказывают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ziegler J.F., Biersack J.P. SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter. – 2010. – IBM, version 2010.01.
2. Ziegler J.F., Biersack J.P., Ziegler M.D. SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter. – www.LuLu.com, 2009. – 398 p.
3. Kinchin G.H., Pease R.S. The Displacement of Atoms in Solids by Radiation // Reports on Progress in Physics. – 1955. – V. 18. – P. 1–51.
4. Robinson M.T., Torrens I.M. Computer simulation of atomic-displacement cascades in solids in the binary-collision approximation // Physical Review B (Condensed Matter). – 1974. – V. 9. – P. 5008–5024.