

6. Егоров А.В., Ключкова Н.В. Экспресс-анализ америция и плутония в почвах. — Гигиена и санитария, 2009, № 3, с. 64—66.
7. Бушуев А.В. Развитие γ /X-спектрометрической методики для контроля загрязненности почв ^{241}Am и Pu : Препринт МИФИ 013-96, 1996. 88 с.
8. Коренков И.П., Прозоров Л.Б., Шатохин А.М., Егоров А.В. X-спектрометрический метод определения плутония в почвах, грунтах и донных отложениях. — Гигиена и санитария, 2006, № 2, с. 72—76.
9. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидем. правила и нормативы. М.: Фед. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
10. Горяченкова Т.А., Нгуен Тхань Бинь, Павлючая Ф.И. Формы нахождения плутония в почвах. — Радиохимия, 1990, № 2, с. 47—54.
11. Дани М., Бредбери Д., Элдер Д. Способ очистки материала, содержащего радиоактивные загрязнения. Патент RU № 2122249 C1 G21F9/28. — Бюл. «Изобретения, полезные модели», 1998, № 32, с. 459.
12. Вайгель Ф., Кац Дж., Сиборг Г. Химия актиноидов. Т. 2. М.: Мир, 1997, с. 333—335.
13. Ермолаев В.М. Физико-химические основы переработки гетерогенных отходов (пульп) радиохимических производств. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. хим. наук. М., 2007.
14. Никитина Г.П., Иванов Ю.Е., Листопадов А.А., Шпунт Л.Б. Существующие методы растворения диоксида плутония. Ч. II. Окислительно-восстановительное растворение диоксида плутония с использованием гомогенного катализатора. — Радиохимия, 1997, т. 39, № 2, с. 112—126.

Поступила в Редакцию 4.05.11

УДК 621.039.7+546.36

ПОЭТАПНАЯ ДЕЗАКТИВАЦИЯ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА, ЗАГРЯЗНЕННОГО ^{137}Cs

Дмитриев С.А., Баринев А.С., Купцов В.М. (МосНПО «Радон», г. Москва)

Разработка эффективных методов дезактивации радиоактивного грунта особенно актуальна в связи с запретом его утилизации. Стоимость хранения радиоактивных отходов высока, поэтому средне- и низкоактивные отходы целесообразно дезактивировать до уровня, определяемого санитарными нормами [1].

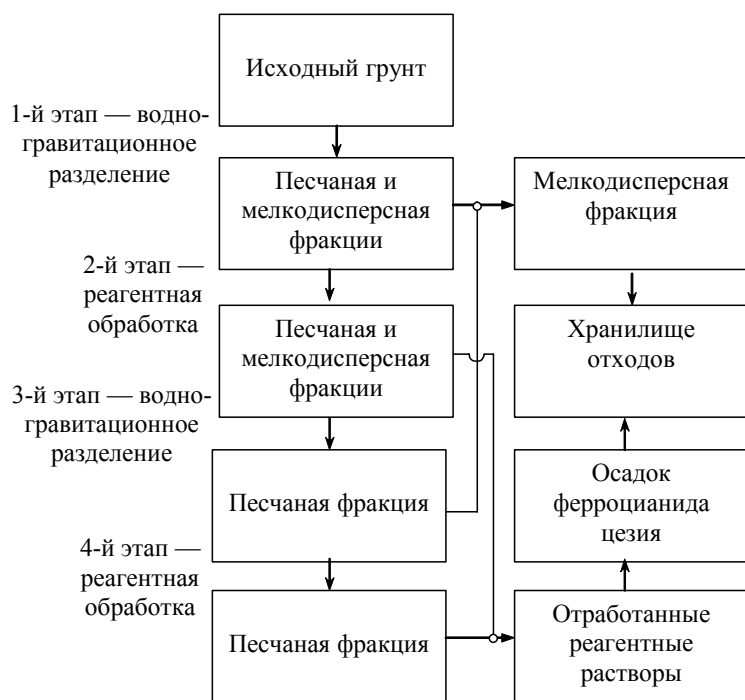
В соответствии с нормами [2] основные пределы дозы облучения в среднем за год составляют для персонала группы А 20 мЗв (1700 рабочих часов), группы Б — 5 мЗв (2000 рабочих часов), населения — 1 мЗв (8800 ч). Подобные уровни дозы обеспечиваются на поверхности полубесконечного пространства, в котором равномерно распределен ^{137}Cs концентрацией 60, 12,6 и 0,57 кБк/кг соответственно [3]. Эти значения можно рассматривать как контрольные при дезактивации.

Простейшим методом дезактивации песчаного грунта является отделение мелкодисперсной фракции (<0,1 мм), с которой обычно связано до 90—95% радионуклидов их исходного количества [1]. Высокая влагоемкость фракции и широко развитая поверхность контакта жидкой и твердой фазы обеспечивают доминирование загрязняющих примесей именно в этой фракции.

Мелкодисперсную фракцию отделяют на установке производительностью 4—5 т/ч при коэффициенте дезактивации 4—5. Метод обладает высокой производительностью, но имеет и недостатки: неполное извлечение, низкий коэффициент дезактивации, часть мелкодисперсного вещества связана с отдельными фрагментами и гидроксидными пленками, и для их разрушения требуется реагентная обработка [4], мелкодисперсное вещество поступает в хранилище, и если его содержание велико, эффективность дезактивации снижается.

Коэффициент дезактивации можно увеличить только реагентной обработкой. Рассмотрим наиболее простой метод — агитационное выщелачивание, при котором во вращающемся реакторе проводится совместная обработка смеси загрязненного грунта и раствора с дезактивирующими реагентами, на примере загрязненного ^{137}Cs песчаного грунта [1].

Методика дезактивации. Оптимальная схема поэтапной дезактивации песчаного грунта приведена на рисунке. Первый этап водно-гравитационного выделения песчаной фракции проводили сотрудники НИЦ «Курчатовский институт». Отделенную мелкодисперсную фрак-



Поэтапная дезактивация песчаного грунта, загрязненного ^{137}Cs

цию направили в хранилище отходов. Песчаную фракцию высушивали при комнатной температуре до постоянной массы и после тщательной гомогенизации измеряли активность ^{137}Cs . На втором этапе ее подвергали реагентной обработке прежде всего для разрушения гидроксидных пленок и других агрегатов, с которыми связана часть мелкодисперсного вещества, не отделившаяся на первом этапе. При этой обработке в реагентный раствор также переходит ^{137}Cs , связанный с песчаной фракцией. На третьем этапе, аналогичном первому, отделяли ранее связанное мелкодисперсное вещество, которое также направляли в хранилище [5]. После полного отделения мелкодисперсной фракции на четвертом этапе проводили реагентную обработку. Если после этого не достигалась активность, соответствующая санитарным нормам, ее повторяли, каждый раз используя реагентный раствор, не содержащий ^{137}Cs [6].

Основными параметрами реагентной обработки являются коэффициент дезактивации, определяемый как отношение исходной активности грунта к достигнутой после проведения очередного этапа обработки (начиная со второго), состав и концентрация реагента, массовое соотношение грунта и реагента, время и температура обработки.

Предварительными экспериментами установлено, что из трех наиболее широко исполь-

зуемых серной, азотной и соляной серная кислота обладает приемлемыми антикоррозионными свойствами и при прочих равных условиях большим коэффициентом дезактивации. На 30% можно увеличить коэффициент дезактивации, используя в качестве реагента смесь серной и фосфорной кислот [7]. Смесь разлагает некоторые силикаты, увеличивая размеры пор, из которых извлекаются загрязняющие примеси. При заданном составе и количестве реагентного раствора основным параметром, определяющим время проведения обработки, является температура. Коэффициент дезактивации возрастает со временем в первом приближении по экспоненциальному закону. Эта закономерность отражает отдельные последовательные этапы извлечения загрязняющей примеси: с поверхностных частей минералов, крупных пор и трещин и, наконец, из наиболее тонких поровых каналов, диффузионный поток

загрязняющей примеси из которых и поставка свежего дезактивирующего раствора занимают значительное время. При $\geq 80^\circ\text{C}$ для исследуемого песчаного грунта при реагентной дезактивации в течение 1 сут коэффициент дезактивации за первые 7—8 ч достигает $\sim 80\%$. Поэтому реагентную дезактивацию целесообразно проводить в течение этого временного интервала.

Реагентную дезактивацию проводили на лабораторной установке, основу которой составляла водяная баня с автоматически поддерживаемой постоянной температурой. Образцы массой 15 г помещали в колбы, заливали реагентным раствором с определенным соотношением жидкой и твердой фазы и непрерывно перемешивали. По окончании обработки пробу охлаждали до комнатной температуры, без взмучивания удаляли реагентный раствор, в пробу для промывки добавляли 10—15 мл воды и сильно встряхивали, после чего раствор декантировали, промывали 5—6 раз. Для извлечения цезия из выделенного раствора и промывных вод вводили раствор ферроцианида щелочного металла или аммония до концентрации $6 \cdot 10^{-4}$ — $7 \cdot 10^{-2}$ М с образованием осадка, содержащего цезий. Осадок направляли в хранилище отходов.

Активность ^{137}Cs в десорбирующем растворе и промывных водах, мелкодисперсной и песчаной фракциях измеряли на полупровод-

никовом гамма-спектрометре с погрешностью, определяемой возможностями γ -спектрального метода (эффективностью регистрации, временем измерения и погрешностями, связанными с отличиями химического состава анализируемых проб).

Основные результаты. В зависимости от состава, концентрации реагентного раствора исследовали изменение коэффициента дезактивации и потери грунта при соотношении жидкой и твердой фазы 0,5/1, 1/1 и 2/1. Реагентную обработку на каждом этапе проводили при 90 °С в течение 7 ч. Эти два параметра являются оптимальными при агитационном выщелачивании. Реагентную дезактивацию песчаного грунта проводили серной кислотой концентрацией 0,5—4 моль/л (табл. 1) и смесью 1—4М серной кислоты с 1М фосфорной кислотой (табл. 2). Для грунта со значительно большей удельной активностью проведено пять последовательных этапов обработки для двух параметров реагентной обработки 2М H_2SO_4 и 2М H_2SO_4 + 1М H_3PO_4 (табл. 3).

Реагентная дезактивация серной кисло-

той. При концентрации серной кислоты 4М и соотношении жидкой и твердой фазы 2/1 по принятой схеме обработки можно снизить исходную удельную активность грунта до $0,2 \pm 0,1$ кБк/кг, что почти в 3 раза меньше удельной активности ^{137}Cs , создающего предельно допустимую дозу облучения для населения [2]. Если требуется значительно меньший коэффициент дезактивации, целесообразно выбирать режим с меньшей концентрацией реагентных растворов, поскольку при этом снижаются расход реагента, требования к стойкости материалов, из которых изготавливается реактор. Снижение соотношения жидкой и твердой фазы увеличивает количество грунта, загружаемого в реактор, т.е. повышает производительность метода, сокращает время очистки.

Конструкция реактора зависит от условий, в которых он эксплуатируется. Поэтому при массовых дезактивационных работах целесообразно иметь несколько различных типов реакторов, различающихся объемом и химической стойкостью конструкционных материалов. Не менее важным параметром является время обработки.

Т а б л и ц а 1. Дезактивация песчаного грунта водно-гравитационным отделением мелкодисперсной фракции и реагентной обработкой серной кислотой при 90 °С в течение 7 ч

Реагент, моль/л	Ж/Т	Второй этап			Третий этап			Четвертый этап		
		<i>A</i> , кБк/кг	<i>K</i>	δ , %	<i>A</i> , кБк/кг	<i>K</i>	δ , %	<i>A</i> , кБк/кг	<i>K</i>	δ , %
0,5	0,5/1	65,5 ± 1,9	1,07 ± 0,03	98,6	26,5 ± 1,1	2,8 ± 0,1	93,6	13,6 ± 0,8	5,5 ± 0,3	92,5
	1/1	52,3 ± 1,5	1,34 ± 0,04	98,4	20,8 ± 1,1	3,5 ± 0,1	94	10,3 ± 0,6	7,2 ± 0,4	93,2
	2/1	50,2 ± 1,8	1,41 ± 0,05	97,7	20,7 ± 0,9	3,6 ± 0,2	93	11,3 ± 0,5	6,6 ± 0,3	92,4
1	0,5/1	48,3 ± 0,9	1,46 ± 0,05	98,5	17,8 ± 0,9	4,2 ± 0,2	93,2	4,7 ± 0,3	16 ± 1	92,1
	1/1	35,7 ± 0,7	1,97 ± 0,06	98,4	14,2 ± 0,7	5,2 ± 0,3	93,6	3,0 ± 0,2	24,9 ± 1,3	92,8
	2/1	27,8 ± 0,5	2,54 ± 0,08	98	11 ± 0,5	6,8 ± 0,4	93,2	2,9 ± 0,2	25,8 ± 1,4	92,6
1,5	0,5/1	29,3 ± 0,9	2,41 ± 0,08	98,2	12,2 ± 0,5	6,08 ± 0,25	93,2	2,3 ± 0,2	32,5 ± 2,1	92,6
	1/1	21,5 ± 0,7	3,27 ± 0,11	98,3	8,5 ± 0,5	8,72 ± 0,45	93,8	1,3 ± 0,1	57,3 ± 4,4	93,2
	2/1	15,7 ± 0,5	4,5 ± 0,15	98	6,7 ± 0,4	11,1 ± 0,6	93,3	1,3 ± 0,1	57,8 ± 4,5	92,5
2	0,5/1	19,9 ± 0,6	3,54 ± 0,11	98	8,9 ± 0,5	8,35 ± 0,42	93,3	0,8 ± 0,1	93,6 ± 5,9	92,4
	1/1	12,7 ± 0,4	5,57 ± 0,18	98	5,7 ± 0,3	13,1 ± 0,6	93,2	0,6 ± 0,1	90 ± 15	92,8
	2/1	13,5 ± 0,5	5,25 ± 0,2	97,8	5,4 ± 0,4	13,9 ± 0,9	92,5	0,8 ± 0,1	118 ± 12	91,5
3	0,5/1	9,7 ± 0,4	7,29 ± 0,26	98,2	4,1 ± 0,3	18,1 ± 1,1	93,6	0,5 ± 0,1	149 ± 15	92,6
	1/1	8,4 ± 0,4	8,4 ± 0,35	98,5	3,8 ± 0,3	19,5 ± 1,3	93,6	0,4 ± 0,1	192 ± 25	92,2
	2/1	5,9 ± 0,3	11,9 ± 0,5	98,1	2,5 ± 0,2	29,7 ± 1,8	93,4	0,3 ± 0,1	252 ± 41	92
4	0,5/1	8,7 ± 0,3	8,15 ± 0,28	98,2	4,3 ± 0,3	17,3 ± 1,0	93	0,4 ± 0,1	187 ± 23	92,2
	1/1	5,0 ± 0,2	14 ± 1,1	98	2,1 ± 0,2	35,4 ± 2,5	93,4	0,3 ± 0,1	243 ± 39	92,5
	2/1	3,8 ± 0,2	22,9 ± 1,8	97,9	1,7 ± 0,1	43,7 ± 2,6	93,2	0,2 ± 0,1	374 ± 94	92,6

Первый этап: $A_{исх} = 69,3 \pm 1$ кБк/кг, $K = 4—5$, $\delta = 75—80\%$.

Таблица 2. Дезактивация песчаного грунта водно-гравитационным отделением мелкодисперсной фракции, реагентной обработкой смесью серной и фосфорной кислот при 90 °С в течение 7 ч

Реагент	Ж/Т	Второй этап			Третий этап			Четвертый этап		
		<i>A</i> , кБк/кг	<i>K</i>	δ , %	<i>A</i> , кБк/г	<i>K</i>	δ , %	<i>A</i> , кБк/кг	<i>K</i>	δ , %
1МН ₂ SO ₄ + 1МН ₃ PO ₄	0,5/1	19,3 ± 1	3,7 ± 0,2	98	7,6 ± 0,7	9,8 ± 0,9	93,4	0,67 ± 0,13	112 ± 22	92,8
	1/1	11,6 ± 0,8	5,6 ± 0,4	97,4	5,3 ± 0,5	13,1 ± 1,2	92,8	0,49 ± 0,12	143 ± 35	91,7
	2/1	9,5 ± 0,8	7,5 ± 0,6	97,4	4,5 ± 0,6	16,5 ± 2,2	93,2	0,44 ± 0,14	222 ± 76	92,8
2МН ₂ SO ₄ + 1МН ₃ PO ₄	0,5/1	7,7 ± 0,5	9,2 ± 0,6	97,9	3,7 ± 0,3	20,1 ± 1,6	93,4	0,36 ± 0,08	207 ± 46	92,9
	1/1	5 ± 0,4	13,1 ± 1	97,6	2,3 ± 0,3	30 ± 3,9	93	0,34 ± 0,1	220 ± 65	92,6
	2/1	4,8 ± 0,4	14,9 ± 1,2	98,2	2,4 ± 0,3	30,9 ± 3,9	93,3	0,22 ± 0,06	321 ± 88	92,2
3МН ₂ SO ₄ + 1МН ₃ PO ₄	0,5/1	4,9 ± 0,4	14,5 ± 1,2	97,7	2,5 ± 0,3	29,9 ± 2,4	92,8	0,29 ± 0,07	257 ± 62	92,2
	1/1	3 ± 0,3	21,5 ± 2,2	97,6	1,6 ± 0,2	43,2 ± 5,4	92,9	0,21 ± 0,05	338 ± 80	91,8
	2/1	2,2 ± 0,3	22,4 ± 2,1	97,5	1,3 ± 0,2	57,3 ± 8,8	92,8	0,2 ± 0,08	374 ± 149	92
4МН ₂ SO ₄ + 1МН ₃ PO ₄	0,5/1	3,4 ± 0,4	20,8 ± 2,4	97,8	1,6 ± 0,3	46,5 ± 8,7	93,1	0,19 ± 0,06	396 ± 125	92,1
	1/1	2,1 ± 0,2	31,3 ± 3	97,5	1,2 ± 0,2	57,8 ± 9,6	93,6	0,16 ± 0,04	415 ± 107	92,6
	2/1	2 ± 0,23	35,8 ± 5,4	97,8	0,8 ± 0,2	94,3 ± 23	93	0,16 ± 0,04	478 ± 120	92,5

Первый этап: $A_{исх} = 69,3 \pm 1$ кБк/кг, $K = 4—5$, $\delta = 75—80\%$.

Таблица 3. Дезактивация песчаного грунта водно-гравитационным отделением мелкодисперсной фракции, реагентной обработкой серной кислотой и смесью серной и фосфорной кислот при температуре 90 °С в течение 7 ч

Реагент	Ж/Т	Второй этап			Третий этап			Четвертый этап			Пятый этап		
		<i>A</i> , кБк/кг	<i>K</i>	δ , %	<i>A</i> , кБк/кг	<i>K</i>	δ , %	<i>A</i> , кБк/кг	<i>K</i>	δ , %	<i>A</i> , кБк/кг	<i>K</i>	δ , %
2 М Н ₂ SO ₄	0,5/1	58,1 ± 2,6	5,3 ± 0,3	97,2	39,4 ± 2,3	7,9 ± 0,5	96,5	4,7 ± 0,4	66 ± 5	96	1,1 ± 0,1	286 ± 13	95
	1/1	33,4 ± 1,4	9,2 ± 0,4	96,8	23,3 ± 1,3	13,4 ± 0,8	95,8	3 ± 0,3	105 ± 12	95,2	1 ± 0,1	315 ± 16	94,8
	2/1	18,8 ± 0,9	16,3 ± 0,8	97,5	12,1 ± 0,8	25,7 ± 1,6	96,2	1,7 ± 0,2	185 ± 22	95	0,9 ± 0,1	354 ± 20	93,8
2М Н ₂ SO ₄ + 1М Н ₃ PO ₄	0,5/1	21,5 ± 1,1	14,7 ± 0,7	94,7	16,4 ± 1,1	19 ± 1	93,7	1,66 ± 0,17	194 ± 20	92,7	0,7 ± 0,1	465 ± 33	91,8
	1/1	6,8 ± 0,3	45,7 ± 2	96,2	4,8 ± 0,3	65 ± 4	95,2	1,13 ± 0,11	280 ± 27	95	0,7 ± 0,1	455 ± 33	93,8
	2/1	5,6 ± 0,5	54,5 ± 4,9	98	4,1 ± 0,4	76 ± 7	96,3	1,27 ± 0,13	257 ± 525	95,5	0,6 ± 0,1	566 ± 47	94,3

Первый этап: $A_{исх} = 299 \pm 3$ кБк/кг, $K = 4—5$, $\delta = 75—80\%$.

Если исходная концентрация грунта невелика, а достигнутые уровни удельной активности соответствуют нормам, можно ограничиться и меньшим числом этапов обработки.

Потери массы исходного грунта для первого и третьего этапов обусловлены отделением мелкодисперсной фракции — 20—25 и 4,8 ± 0,2% соответственно. На третьем этапе зависимость потери массы от состава и количества реагента, используемого на втором этапе, не обнаруживается. Это свидетельствует о том, что почти вся мелкодисперсная составляющая исследуемого грунта отправлена в хранилище отходов. На втором и четвертом этапах потери на растворение почти не зависят от концентрации реагента и в среднем составляют 1,8 ± 0,2 и 0,8 ± 0,3%

соответственно. Большие потери на втором этапе обусловлены наличием в пробе 4,8% мелкодисперсного вещества. Общие потери грунта на растворение составили 2,6 ± 0,4%. В хранилище отправлено 25—30% мелкодисперсного вещества. Соли после выделения из раствора по мере накопления попадают в класс химических отходов, обращение с которыми зависит от содержания в них токсических веществ.

Реагентная дезактивация смесью серной и фосфорной кислот. Смесь серной и фосфорной кислот обладает способностью растворять некоторые силикаты [7]. Предварительные эксперименты показали небольшое (~30%) преимущество использования этой смеси (см. табл. 2). Максимальный коэффициент дезакти-

вации достигнут при обработке смесью $4\text{M H}_2\text{SO}_4 + 1\text{M H}_3\text{PO}_4$ при соотношении жидкой и твердой фазы 2/1. Удельная активности ^{137}Cs при этом составила $0,16 \pm 0,04$ кБк/кг, что в 3,5 раза ниже допустимой нормами для населения [2]. Погрешность определения активности ^{137}Cs после четвертого этапа обработки слишком велика, чтобы можно было оценить эффективность использования фосфорной кислоты. Анализ коэффициентов дезактивации для второго этапа в табл. 1, 2 показывает, что замена 1М серной кислоты на 1М фосфорной подтверждает указанное преимущество использования смеси кислот. Следует отметить, что стоимость фосфорной кислоты по сравнению с серной в 2 раза выше.

Потери массы грунта при обработке смесью кислот также не отличаются от потерь при обработке серной кислотой — $4,7 \pm 0,4\%$ массы исходного грунта составляет мелкодисперсная фракция, отправленная в хранилище после третьего этапа реагентной обработки, $2,4 \pm 0,3\%$ растворилось в реагенте на втором этапе, $0,8 \pm 0,3\%$ — на четвертом этапе. Полные потери на растворение при реагентной обработке составили $3,2 \pm 0,4\%$, в хранилище направлено 25—30% исходного грунта.

Дезактивация песчаного грунта с 4 раза большей исходной удельной активностью 2М H_2SO_4 и смесью 2М $\text{H}_2\text{SO}_4 + 1\text{M H}_3\text{PO}_4$ в качестве реагентов не позволила за четыре этапа обработки достичь удельной активности, соответствующей нормам для населения, поэтому был проведен пятый этап, идентичный четвертому

(см. табл. 3). Но даже в этом случае требуемую удельную активность в пределах погрешности удалось получить лишь при реагентной обработке смесью кислот. При этом потери на растворение при реагентной обработке на втором, четвертом, пятом этапах составили $3,3 \pm 1,1$, $0,7 \pm 1,1$, $1,1 \pm 0,1\%$ соответственно, полные потери на растворение — $5,1 \pm 1,1\%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Иванов О.П. и др. Дезактивация радиоактивно загрязненного грунта в РНЦ «Курчатовский институт». — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 6, с. 381—387.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М., Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Госпотребнадзора, 2009. 100 с.
3. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. Т. 1. Физические основы защиты от излучений. М.: Атомиздат, 1980. 462 с.
4. Дмитриев С.А., Баринов А.С., Купцов В.М. Способ очистки грунтов от радионуклидов. Патент RU 2 388 084, 2008. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2009, № 12, ч. 4, с. 1009.
5. Чаповский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М.: Недра, 1975. 304 с.
6. Дмитриев С.А., Прозоров Л.Б., Купцов В.М. Способ очистки грунтов от радионуклидов цезия. Патент RU 2 361 301, 2007. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2009, № 19, ч. 3, с. 812.
7. Дмитриев С.А., Николаевский В.Б., Прозоров Л.Б., Щеглов М.Ю. Способ очистки грунтов от радионуклидов цезия. Патент RU 2 274 915. — Там же, 2006, № 11, ч. 2, с. 525.

Поступила в Редакцию 22.12.2010

УДК 621.039

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОРТАТИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Ромоданов В.Л., Сахаров В.К., Черникова Д.Н. (НИЯУ МИФИ, г. Москва),
Рыжков В.И., Хасаев Т.О., Сладков А.А. (ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова, г. Москва)

Нейтронные генераторы как источники интенсивного нейтронного излучения в настоящее время широко используются в различных областях науки и техники. Производство портативных импульсных нейтронных генераторов в еще большей степени расширяет диапазон их применения. Принято считать, что генераторы испускают нейтроны в узком энергетическом диапа-

зоне вблизи энергии 2,5 и 14,7 МэВ в зависимости от реакции их получения (D, D) или (D, T) и изотропно из точки падения дейтронного пучка на мишень. Однако мишень любого генератора окружена разными конструкционными материалами, проходя через которые нейтроны мишени могут как рассеиваться, так и поглощаться. Это приводит к изменению углового и энергетиче-