

мая мощность 2,8 кВт, температура факела 8000 °С, толщина разрезаемого стального листа до 14 мм, скорость резки листа толщиной 10 мм 0,18 м/мин, расход рабочей жидкости не более 0,25 л/ч.

Для удаления загрязненных слоев металлических поверхностей и поверхностей строительных конструкций использовали различное промышленное оборудование — шлифмашины, отбойные молотки, скарификаторы, различные электрошетки. Для максимально полного удаления образующихся аэрозолей применяли промышленные пылесосы и пылевлагососы, подключенные к централизованной системе спецвентиляции. Использовали и автономные системы газоочистки.

Дезактивация грунта. В институте разработана технология переработки радиоактивно загрязненного грунта, которая основана на принципе механической гидроклассификации, позволяющей разделять загрязненный грунт на очищенную фракцию и обогащенный радионуклидами концентрат. Эффективность метода обеспечивают свойства самих грунтов: как правило, свыше 80% радионуклидов обычно концентрируются в мелкой глинистой фракции с размерами частиц менее 50 мкм, по массе не превышающей 10% массы исходного материала. Гидроклассификация проводится в специально создаваемой водной суспензии грунта в пульсационной колонне с насадкой типа КРИМЗ.

Была создана и успешно испытана на радиоактивно загрязненных грунтах из Брянской области и РНЦ «Курчатовский институт» опытная установка производительностью 0,5 т/ч. Разработан технический проект мобильной промыш-

ленной установки производительностью 20 т/ч [3].

Таким образом, в институте разработаны новые эффективные технологии и оборудование для дезактивации, в частности, стендовые установки лазерной, электрохимической, пенной дезактивации, установки для дезактивации грунтов. Их применение в условиях консолидации материальных и кадровых ресурсов и централизованного планирования всей деятельности в области дезактивации, реабилитации и обращения с отходами позволяет успешно решать задачи по ликвидации радиоактивно загрязненных объектов ВНИИНМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полуэктов П.П., Суханов Л.П., Черников М.А. Проблемы «радиационного наследия» ФГУП ВНИИНМ имени А.А. Бочвара. Тезисы докл. Межд. конф. «Безопасность ядерных технологий: обращение с РАО и ОЯТ». СПб, 2007, с. 1—5.
2. Черников М.А. Обзор работ ФГУП ВНИИНМ в области обращения с РАО, дезактивации и реабилитации, выполненных в рамках проектов МНТЦ. Тезисы Межд. научного семинара «От экологических исследований к экологическим технологиям». Челябинск, 2006, с. 1—3.
3. Поляков А.С., Науменко Н.С., Полуэктов П.П. Пульсационная техника: функциональность, эффективность, безопасность. — Безопасность окружающей среды, 2006, № 1, с. 22—35.

Поступила в Редакцию 14.05.08

УДК 539.16.04+546.791.027

ХИМИЧЕСКАЯ И РАДИАЦИОННАЯ ОПАСНОСТЬ АЭРОЗОЛЕЙ УРАНА

Петрина Л.С. (РФЯЦ — ВНИИЭФ)

В НРБ-99 отмечается, что при хроническом ингаляционном поступлении в организм человека растворимых соединений ^{238}U и ^{235}U химическая токсичность превышает их радиотоксичность. Однако в нормативной документации нет четкий орган при этом почки). После вдыхания малорастворимых соединений большая часть

критериев оценки химической опасности разового поступления аэрозолей урана.

Растворимые соединения урана при ингаляционном поступлении быстро всасываются в кровь и разносятся по органам и тканям (критику урана задерживается в легких. Параметры, характеризующие токсичность малорастворимых и

растворимых соединений урана (скорость развития интоксикации, степень тяжести поражения, возможность развития отдаленных последствий и др.), сильно отличаются. Поэтому предлагаемые в статье критерии обосновываются для каждой группы соединений отдельно.

Обобщенные данные о химической токсичности соединений урана [1—7] приведены в табл. 1, 2. Они получены следующим образом. Для растворимых соединений типа уранил-фторида период полувыведения $T_{1/2}$ из организма человека составляет 8, 85, 240 сут с содержанием урана 90, 8 и 2% соответственно, для U_3O_8 — UO_2 — 7, 70, 390 сут с содержанием урана 40, 53 и 7% соответственно [4]. С учетом этих данных накопленная масса растворимых соединений урана при хроническом воздействии описывает-

ся следующим соотношением для равновесного состояния, когда скорость поступления вещества в организм равна скорости его выведения:

$$M = CVt / ((0,9 \cdot 0,693)/T_1 + (0,08 \cdot 0,693)/T_2 + (0,01 \cdot 0,693)/T_3), \quad (1)$$

где C — концентрация урана в воздухе, mg/m^3 ; V — скорость дыхания, $m^3/ч$; t — продолжительность воздействия в течение суток, ч. Тогда при хроническом поступлении на уровне ПДК ($0,015 mg/m^3$ [8]) за 7 ч рабочей смены при объеме вдыхаемого воздуха $0,015 m^3/мин$ равновесное накопление в организме растворимых соединений урана соответствует массе 1,2 мг. Накопление малорастворимых соединений урана при хроническом поступлении на уровне ПДК ($0,075 mg/m^3$) составляет 11 мг.

Отдаленные последствия инкорпорации урана изучены в основном на подопытных животных. Так, злокачественные новообразования в легких собак развивались через 32—56 мес после ежедневного часового в течение 5 лет вдыхания U_3O_8 — UO_2 концентрацией 31—91 mg/m^3 . Клинические признаки интоксикации характеризовались небольшими отклонениями с постепенно нарастающими признаками пневмосклероза. При переносе этих данных на организм человека с помощью коэффициента [9] эквивалентное поступление U_3O_8 — UO_2 за 1 ч воздействия при минимальной концентрации составило бы 11 мг, накопление по формуле (1) — 246 мг. Хотя поглощенную дозу на легкие авторы [4] оценили равной 8 Зв, согласно нашим оценкам она составила 300 мЗв, поскольку накопление 17 мг малорастворимых соединений ^{238}U соответствует годовой дозе облучения 20 мЗв. В описанном опыте опухоль могла развиваться в результате длительного внутреннего облучения тканей.

Известен также случай развития рака легкого у работника завода по производству топлива в Ханфорде (США) при хроническом воздействии природного урана [4]. В течение 14 лет он резал урановые прутки на заготовки и сжигал бракованные изделия для получения U_3O_8 — UO_2 . В процессе наблюдения в его легких содержание урана достигало ~50 мг урана, по оценкам наблюдавших его специалистов дозовые нагрузки на легкие за последние 4 года его работы колебались в пределах 400 мЗв—1 Зв. Если учитывать, что накопление 8,3 мг малорастворимых

Таблица 1. Последствия, характеризующие химическую опасность хронического поступления аэрозолей урана в организм человека

Накопление, мг	Последствия
	Малорастворимые соединения
11	Отсутствуют (поступление на уровне ПДК)
50*	Злокачественные новообразования, обусловленные химической токсичностью
100—150	Острое заболевание
240	Злокачественные новообразования, обусловленные радиационным воздействием
570	Смерть в 50% случаев
	Растворимые соединения
1,2	Отсутствуют (поступление на уровне ПДК)
5	Умеренные заболевания
10—50	Острое заболевание
190	Смерть в 50% случаев

*Гипотетический параметр.

Таблица 2. Последствия, характеризующие химическую опасность разового поступления аэрозолей урана в организм человека

Поступление, мг	Последствия
Малорастворимые соединения	
25	Острое заболевание
150	Смерть в 50% случаев
Растворимые соединения	
9	Острое заболевание
60	Смерть в 50% случаев

соединений природного урана соответствует годовой дозе 20 мЗв, то доза внутреннего облучения рабочего не превышала 120 мЗв/год. Некоторые радиобиологи годовую дозу 100 мЗв уверенно называют дозой, при которой не может возникнуть злокачественных новообразований [10]. Тогда возникновение злокачественных новообразований в данном случае могло быть следствием химической токсичности, а не радиационного воздействия (в табл. 1 этот параметр отмечен как гипотетический).

Так как в практической деятельности имеют дело как с природным, так и с обогащенным ураном, целесообразно определить, какой из эффектов воздействия на организм (химическое токсическое или радиационное воздействие) преобладает и при каком поступлении урана.

Массе 1 г ^{235}U соответствует активность 80 кБк. По нормам радиационной безопасности для быстрорастворимых соединений предел годового поступления для персонала составляет 27 кБк, или 338 мг (1,2 мг/сут при 2000 рабочих часах в год и 7-часовой смене). В соответствии с формулой (1) при таком хроническом поступлении допустимое накопление ^{235}U составит 15 мг, что больше 1,2 мг — допустимого накопления вследствие его химической токсичности на уровне ПДК для рабочей зоны. Следовательно, опасность накопления этого радионуклида определяется химической токсичностью. Для малорастворимых соединений ^{235}U предел годового поступления составляет 2,6 кБк, или 33 мг и 0,12 мг/сут, чему соответствует накопление 2,6 мг. Допустимое накопление, исходя из токсической опасности, составляет 11 мг. Следовательно, для малорастворимых соединений ^{235}U опасность накопления при ингаляционном поступлении в организм на этом уровне связана прежде всего с радиационным воздействием.

Для ^{238}U и обедненного урана массе 1 г соответствует активность 12,4 кБк. Для быстрорастворимых соединений предел годового поступления составляет 6 кБк, или 484 мг (1,69 мг/сут), что приводит к накоплению в организме 21,7 мг урана. Это больше 1,2 мг, следовательно, опасность накопления связана с химической токсичностью. Для малорастворимых соединений ^{238}U и обедненного урана предел годового поступления составляет 2,7 кБк, чему соответствует поступление ~220 мг, 0,77 мг/сут и накопление 17 мг урана, что сопоставимо с 11 мг по условиям химической токсичности.

Следовательно, опасность связана и с химической, и с радиационной токсичностью.

Природный уран содержит, %: 0,71 ^{235}U , 99,28 ^{238}U , 0,0054 ^{234}U . Массе 1 г природного урана соответствует активность 25 кБк. Для быстрорастворимых соединений предел годового поступления составляет 594 кБк, или 240 мг (0,84 мг/сут). При хроническом поступлении накопление урана составит 10,8 мг, что больше 1,2 мг, следовательно, быстрорастворимые соединения природного урана опасны как химические вещества. Для малорастворимых соединений предел годового поступления составляет 2,67 кБк, что соответствует поступлению в легкие 107 мг, или 0,37 мг/сут. При хроническом поступлении накопление урана составит 8,3 мг, что сопоставимо с 11 мг (критерий химической токсичности), следовательно, опасность природного урана связана и с химической, и с радиационной токсичностью.

Сравнение накопления соединений урана, в том числе с большим обогащением показало, что при хроническом поступлении на уровне годового предела химическая токсичность является определяющим фактором опасности для быстрорастворимых соединений природного урана, ^{235}U и ^{238}U , что совпадает с НРБ-99. Для растворимых и малорастворимых соединений ^{234}U и высокообогащенного урана определяющим является радиационное воздействие. Малорастворимые соединения природного урана, ^{238}U и растворимые соединения высокообогащенного урана опасны и как химические, и как радиоактивные вещества.

НРБ-99 ограничивает годовое поступление быстрорастворимых соединений ^{238}U на уровне 500 мг. При таком поступлении в организме накапливается 22 мг, что может вызвать заболевание почек. Если исходить из представлений, что накопление 5 мг растворимых соединений ^{238}U вызывает умеренные обратимые заболевания, целесообразно ограничить их годовое поступление на уровне 100 мг (0,35 мг/сут, накопление 4,5 мг).

Для оценки дозы, полученной человеком в результате разового поступления соединений урана с учетом их выведения из организма, определили эквивалентное накопление урана и создаваемую им радиационную нагрузку на организм. Используя указанные в начале статьи периоды полувыведения и долю каждого из трех

процессов выведения, нашли, что накопление урана составляет 5,1 мг при разовом поступлении 25 мг малорастворимых соединений и 0,55 мг при разовом поступлении 9 мг растворимых соединений урана. Зная накопление на уровне предела годового поступления, которое согласно НРБ-99 создает дозу 20 мЗв, можно определить дозу, обусловленную эквивалентным накоплением. В табл. 3 приведена доза радиационного воздействия при разовом поступлении соединений урана, вызывающем острое заболевание вследствие химической токсичности. В расчетах учитывали, что накопление быстрорастворимых соединений ^{235}U , ^{238}U и природного урана в соответствии с НРБ-99 создает дозу 13,8 и 2,9 мЗв/год.

Т а б л и ц а 3. Опасность разового поступления аэрозолей урана

Изотоп, смесь изотопов	Тип соединения	Поступление, мг	Доза, Зв/год
^{234}U	Б*	9	1,6
	М	25	131
^{235}U	Б	9	$5 \cdot 10^{-4}$
	М	25	$3,9 \cdot 10^{-2}$
^{238}U	Б	9	$7,4 \cdot 10^{-5}$
	М	25	$6 \cdot 10^{-3}$
Природный уран	Б	9	$1,5 \cdot 10^{-4}$
	М	25	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Уран, обогащение 20%	Б	9	$2,2 \cdot 10^{-3}$
	М	25	0,18
Уран, обогащение 36%	Б	9	$5,5 \cdot 10^{-3}$
	М	25	0,4
Уран, обогащение 90%	Б	9	$1,6 \cdot 10^{-2}$
	М	25	1,3

*Быстро- и малорастворимые соединения.

Согласно современным представлениям [11] радиационное воздействие на организм допустимо на уровне 100 мЗв без риска гибели в отдаленном будущем от инициируемых облучением раковых заболеваний. Очевидно, что только малорастворимые соединения урана, содержащие 20, 36 и 90% ^{235}U , а также ^{234}U опасны своим радиационным действием при разовом поступлении в организм в таком количестве, которое вызывает острое заболевание вследствие их химической токсичности.

В атомной промышленности в основном уже достигнут такой уровень безопасности, при котором нагрузка на персонал не превышает 10 мЗв/год. В этих условиях в качестве целей для анализа риска предлагаются следующие проектные критерии приемлемого радиационного риска [12]:

при нормальных условиях работы предел годового поступления ограничить дозой нагрузкой 10 мЗв/год для лиц категории А (допущенных к работам с ураном), 1 и 0,1 мЗв/год — лиц категории Б (работающих в смежных подразделениях в пределах санитарно-защитной зоны опасного производственного объекта) и населения, для растворимых соединений ^{238}U допустимое поступление в организм персонала категорий А и Б ограничить в соответствии с их химической токсичностью;

при проектных авариях с вероятной частотой $P \geq 10^{-2}$ 1/год разовое поступление в организм персонала категории А ограничить на уровне 10 мЗв, $10^{-2} > P \geq 10^{-4}$ 1/год — 50 мЗв, $10^{-4} > P \geq 10^{-7}$ 1/год — 100 мЗв. Для персонала категории Б эти уровни снизить в 10 раз. Поступление ^{238}U ограничить в связи с его химической токсичностью — таким образом, чтобы не возникало острых заболеваний при авариях с вероятной частотой $\geq 10^{-4}$ 1/год. Для населения разовое ингаляционное поступление не должно превышать годовых поступлений при нормальных условиях проживания 0,1 мЗв, т.е. воздействие по всем путям облучения остается на уровне, сравнимом с фоном;

при запроектных авариях разовое поступление для населения следует ограничить 100 мЗв, чтобы заболевания не приводили к развитию в отдаленном будущем злокачественных новообразований, а значит, была исключена необходимость мер вмешательства.

Сделанные нами оценки позволяют выработать критерии для работ с соединениями урана с учетом как радиационной, так и токсической опасности хронического и аварийного воздействия (табл. 4). Для удобства прогнозирования последствий выбросов аэрозолей урана уровни его поступления в организм приведены в единицах массы.

Т а б л и ц а 4. Проектные уровни приемлемого индивидуального риска для работ с соединениями урана

Персонал	Нормальные условия, мг/год	Аварии			
		проектные			запроектные
		Оцененная вероятность, 1/год			
		$P \geq 10^{-2}$	$10^{-2} > P \geq 10^{-4}$	$10^{-4} > P \geq 10^{-7}$	$P < 10^{-7}$
Категория А	Максимально допустимое поступление аэрозолей малорастворимых соединений урана, мг				
	220*	6	15	25	Не ограничено
	1,5*	0,6	3	6	
0,5*	0,2	1	2		
Категория Б	220	4	15	25	То же
	0,15	0,06	0,3	0,6	
	0,05	0,2	0,1	0,2	
Население	2,2	0,4 ($P \geq 10^{-7}$)			25
	0,03	0,006			6
	0,01	0,002			2
Категория А	Максимально допустимое поступление аэрозолей растворимых соединений урана, мг				
	100*	6	6	9	Не ограничено
	22*	6	6	9	
7*	6	6	9		
Категория Б	100	6	6	9	То же
	2,2	1,6	6	9	
	0,7	0,6	3	6	
Население	2,2	3 ($P \geq 10^{-7}$)			9
	0,03	0,2			9
	0,01	0,06			9
*Поступление ^{238}U , урана обогащением 36%, 90% соответственно. Критерии для урана обогащением 90% применимы при условии, что в нем содержится не более $2 \cdot 10^{-5}\%$ ^{232}U . При более высоком содержании критерии поступления урана в организм должны пропорционально снижаться.					

*Поступление ^{238}U , урана обогащением 36%, 90% соответственно. Критерии для урана обогащением 90% применимы при условии, что в нем содержится не более $2 \cdot 10^{-5}\%$ ^{232}U . При более высоком содержании критерии поступления урана в организм должны пропорционально снижаться.

При определении радиуса зоны вмешательства, в пределах которой аварийный выброс урана вызывает острые, но обратимые заболевания, можно ориентироваться на ингаляционное поступление в организм 9 мг растворимых или 25 мг малорастворимых соединений урана (6 мг для урана обогащением 36% и 2 мг для урана обогащением 90% соответственно вследствие их радиационной опасности).

Предложенные критерии позволят обеспечить приемлемый уровень риска для всех категорий людей при авариях, связанных с выбросом урана, — риск не превысит $5 \cdot 10^{-4}$ 1/год для персонала категории А, $5 \cdot 10^{-5}$ 1/год для персонала категории Б, $5 \cdot 10^{-6}$ 1/год для населения. При этом суммарный риск гибели от аварий и вследствие развития онкологических заболеваний при

нормальных условиях работы не превысит 10^{-3} 1/год для персонала и $5 \cdot 10^{-5}$ 1/год для населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галибин Г.П., Новиков Ю.В. Токсикология промышленных соединений урана. М.: Атомиздат, 1976.
2. Вредные вещества в промышленности. Изд. 7-е. Т. 3. Под ред. Н.В. Лазарева, И.Д. Гадаскиной. Л.: Химия, 1977.
3. Радионуклиды и производственная деятельность человека. Справочник. Под ред. Л.А. Булдакова, В.С. Каллистратовой. М., МЗ РФ ИБФ, 1997.
4. Андреева О.С., Бадьин В.И., Корнилов А.Н. Природный и обогащенный уран. Радиационно-гигиенические аспекты. М.: Атомиздат, 1979.
5. Фармакология и токсикология урановых соединений. Пер. с англ. Т. 2. М.: Изд-во иностр. лит., 1951.

6. **Некоторые** вопросы токсичности ионов металлов. Пер. с англ. Под ред. Х. Зигеля, А. Зигель. М.: Мир, 1993.
7. **Материалы** по токсикологии радиоактивных веществ (торий-232, уран-238). Вып. 4. Под ред. А.А. Летавета, Э.Б. Курляндской. М.: Медицина, 1964.
8. **Беспамятнов Г.П., Кротов Ю.А.** ПДК химических веществ в окружающей среде. Справочник. Л.: Химия, 1985.
9. **Рыболовлев Ю.Р., Рыболовлев Р.С.** Дозирование веществ для млекопитающих по константам биологической активности. — Доклады АН, 1979, т. 247, № 6, с. 1513—1516.
10. **Жуковский М.В.** Проблема выбора между линейной беспороговой концепцией радиационного риска и концепцией практического порога. Тезисы докл. X Межд. экологического симпозиума «Урал атомный. Урал промышленный». Свердловск, ИПЭ УрО РАН, 2002.
11. **Цыб А.Ф., Иванов В.К.** Канцерогенные риски малых доз облучения: текущее состояние проблемы и ее значение для обеспечения радиационной безопасности. — В сб.: Экологическая безопасность, техногенные риски и устойчивое развитие. 13-я ежегодная конф. Ядерного об-ва России. М., 2002, с. 238—241.
12. **Петрин С.В., Коваленко О.В., Пинаев В.С. и др.** Анализ безопасности установок и технологий. Методическое пособие по проблемам регулирования риска. Саров, ИПК РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2006.

Поступила в Редакцию 6.12.07

Рефераты статей

УДК 621.039.5

А с м о л о в В.Г., За г р я з к и н В.Н., Ц у р и к о в Д.Ф., У г л о в В.С., В и ш н е в с к и й В.Ю., Д ь я к о в Е.К., К о т о в А.Ю., Р е п н и к о в В.М. **Исследование распределения продуктов деления между металлической и оксидной фазой расплава в корпусе ВВЭР-1000 при тяжелой аварии.** — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 1, с. 3—7.

В работе изложены результаты исследований взаимодействия расплава $U-Zr-B-C-O$ со сталью, выполненных по международной программе OECD MASCA. Установлено, что присутствие в расплаве Mo, Ru, Sr, Ba, Ce, La качественно не влияет на взаимодействие с конструкционной сталью и характер стратификации расплава в корпусе реактора. Определены коэффициенты распределения продуктов деления между оксидной и металлической фазой в зависимости от степени окисления расплава, отношения U/Zr , состава конструкционной стали и температуры. Табл. 10, список лит. 8 назв.

УДК 621.039.51

Л и з о р к и н М.П. **Двухгрупповое редкосеточное нодальное уравнение баланса нейтронов программы БИПР-8.** — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 1, с. 8—14.

Рассмотрен переход от конечно-разностных диффузионных уравнений для решения задачи переноса нейтронов в ВВЭР к нодальным редкосеточным уравнениям баланса нейтронов, используемым в программе БИПР-8. Уменьшение погрешности решения задачи достигается за счет истов поведения микротвзлов при нормальных условиях облучения ($<1300\text{ }^{\circ}\text{C}$). В статье обсуждены первые результаты таких расчетов. Рис. 12, табл. 3, список лит. 27 назв.

пользования пробных функций для описания поля нейтронов внутри ячеек в дополнение к условию непрерывности потока и тока нейтронов на общих границах между ячейками. Приведены соответствующие нодальные уравнения для решения задач трехмерной кинетики нейтронов в программе БИПР-8КН. Рис. 1, список лит. 7 назв.

УДК 621.039.5:546.53

Г о л у б е в И.Е., К у р б а к о в С.Д., Ч е р н и к о в А.С. **Расчетно-экспериментальные исследования пироуглеродных и карбидокремниевых барьеров микротвзлов ВТГР.** — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 1, с. 14—25.

Безопасность ВТГР обеспечивается системой барьеров, ограничивающих выход продуктов деления из активной зоны в окружающую среду при нормальных режимах эксплуатации и постулируемых проектных авариях. Рассмотрен расчетно-экспериментальный анализ двух принципиально важных барьеров, ответственных за удержание радионуклидов, защиту персонала и окружающую среду: топливные керны и их покрытия. Применительно к микротвзлам ВТГР рассмотрены функции барьеров и требования к ним. Проведен анализ результатов послереакторных исследований.

Проанализированы разработанные математические модели и расчетные коды, моделирующие поведение микротвзлов. Для оценки поведения микротвзлов в процессе облучения разрабатываются вероятностно-статистическая модель и код GOLT. Наряду с другими моделями он используется для проведения тестовых сравнительных расче-

УДК 621.039.536