

11. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

11.1 Радиотоксичность плутония

Хотя плутоний химически токсичен, как и любой тяжелый металл, но этот эффект выражается слабо по сравнению с его радиотоксичностью. Все изотопы и соединения плутония ядовиты. Токсические свойства плутония появляются как следствие α -радиоактивности, т.к. обычно приходится работать с α -активными изотопами плутония (например, с ^{239}Pu). Альфа частицы представляют серьезную опасность только в том случае, если их источник находится в теле (т.е. плутоний должен быть принят внутрь). При этом, α -частицы повреждают только ткани, содержащие плутоний или находящиеся в непосредственном контакте с ним. Хотя плутоний излучает еще и γ -лучи и нейтроны, которые могут проникать в тело снаружи, уровень их слишком мал, чтобы причинить сильный вред. Разные изотопы плутония обладают разной токсичностью: типичный реакторный плутоний в 8-10 раз токсичнее чистого ^{239}Pu .

Замечание. В СМИ регулярно утверждается, что плутоний – самое токсичное вещество из известных человеку, а ^{239}Pu – самый вредный изотоп. Враньё!

Плутоний отнюдь не самый радиотоксичный элемент. Если радиологическую токсичность ^{238}U принять за единицу, этот же показатель для плутония и некоторых других элементов образует ряд:

$$^{235}\text{U} 1.6 - ^{239}\text{Pu} 5.0 \cdot 10^4 - ^{241}\text{Am} 3.2 \cdot 10^6 - ^{90}\text{Sr} 4.8 \cdot 10^6 - ^{226}\text{Ra} 3.0 \cdot 10^7$$

Можно видеть, что радий почти тысячу раз опаснее плутония-239.

При поступлении с водой и пищей, плутоний менее ядовит, чем такие известные вещества, как кофеин, ацетаминофен, некоторые витамины, псевдоэфедрин и множество растений и грибов. Он чуть менее вреден этилового спирта, но вреднее табака и, тем более, всех запрещённых наркотиков. С химической точки зрения при приёме внутрь, он ядовит как свинец и другие тяжёлые металлы (*Кто пробовал, утверждают, что у плутония типичный вкус металла*). Спорообразующие палочки, вызывающие ботулизм, бактерии вызывающие столбняк, мухоморы и т.п. намного страшнее плутония. Не так уж опасен плутоний и при вдыхании – с точки зрения ингаляции это – рядовой токсин (примерно соответствует парам ртути).

Не удивительно, что за всю историю ядерной индустрии достоверно зафиксирован единственный случай смерти от плутония, а смерти из-за плутония, попавшего в организм человека через лёгкие или желудок, до сих пор ни разу не случилось (здесь мы не учитываем гибель нескольких человек, превысивших на своём рабочем месте критическую массу плутония). Выжили и те 26 американцев, кто был переоблучён плутонием в 40-ых годах, а также 18 добровольцев, которым вводили плутоний для изучения темпов его вывода из человеческого организма.

Другое дело, что при ингаляции плутоний обладает канцерогенным эффектом и способен вызвать рак лёгкого. Но опять же: природные β - и γ - излучатели (например, ^{14}C и ^{40}K) при поступлении с пище гораздо канцерогенней, так как могут вызывать такие виды раков, на которые α -излучатели (в том числе – плутоний), в принципе не способны.

Тем не менее, плутоний, естественно, опасен, т.к. при вдыхании и при приёме пищи, концентрируется непосредственно в кроветворных участках костей и может вызвать заболевание даже через много лет после поступления в организм.

α -частицы обладают относительно малой проникающей способностью: для ^{239}Pu пробег α -частиц в воздухе составляет 3,7 см, а в мягкой биологической ткани - 43 мк. В совокупности с высокой полной ионизацией ($1,47 \cdot 10^7$ пар ионов на одну α -частицу) небольшая величина пробега обуславливает значительную величину плотности ионизации. А чем выше плотность ионизации, тем больше биологический эффект. Поскольку пробег α -частиц в твёрдом веществе мал, резиновые перчатки, надетые на руки работающего, служат достаточной защитой.

Особенно опасно попадание радиоактивных веществ внутрь организма. В связи с тем, что α -излучение плутония производит большие необратимые изменения в скелете, печени, селезёнке и почках, все изотопы плутония относят к группе элементов с особо высокой радиотоксичностью (группа А токсичности). Эти изменения трудно диагностировать; они не проявляются настолько быстро, чтобы можно было принять меры к искусственному выведению плутония с помощью растворов комплексообразующих реагентов.

Хотя плутоний - металл, он крайне летуч. Стоит пронести открытый его образец через комнату, как допустимое содержание плутония в воздухе будет превышено. Кроме того, он очень склонен к образованию аэрозолей. Поэтому в процессе дыхания он легко проникает в легкие и бронхи. Хотя плутоний излучает ещё и γ -лучи и нейтроны, которые могут проникать в тело снаружи, уровень их слишком мал, чтобы причинить сильный вред. α -частицы повреждают только ткани, содержащие плутоний или находящиеся в непосредственном контакте с ним. Значимы два типа действия: острое и хроническое отравления. Если уровень облучения достаточно высок, ткани могут страдать острым отравлением, токсическое действие проявляется быстро. Если уровень низок, создается накапливающийся канцерогенный эффект.

Токсичность плутония сильно зависит от пути его поступления в организм. Значимы два типа действия: острое и хроническое отравления. Если уровень облучения достаточно высок, ткани могут страдать

острым отравлением, токсическое действие проявляется быстро. Если уровень низок, создается накопляющийся канцерогенный эффект.

Количество плутония, попавшего в организм с пищей, определяется коэффициентом всасывания: $K=1 \cdot 10^{-3}$. Для биологически инкорпорированного (связанного) плутония коэффициент выше $K=1 \cdot 10^{-2}$, причём K всасывания возрастает в 10-100 раз для детей по отношению к взрослым.

Плутоний может попадать в организм через раны и ссадины, путем вдыхания или заглатывания. Однако наиболее опасный путь попадания его в организм - поглощение из легких.

Ингаляция является основным путём поступления плутония, т. к. потребность человека в воздухе примерно в 10 тыс. раз больше, чем в воде и пище. Значительное количество осажденного плутония возвращается в атмосферу с пылью. Попавший в лёгкие плутоний частично оседает на поверхности лёгких, частично переходит в кровь, затем - в костный мозг и лимфоузлы. Примерно 60% попадает в костную ткань, 30% - в печень и 10% выводится естественным путем. Количество захваченного при вдыхании плутония зависит от таких факторов, как величина аэрозольных частиц и растворимость в крови.

Плутоний очень плохо всасывается желудочно-кишечным трактом, даже когда попадает в виде растворимой соли, впоследствии она все равно связывается содержимым желудка и кишечника. Загрязненная вода, из-за предрасположенности плутония к осаждению из водных растворов и к формированию нерастворимых комплексов с остальными веществами, имеет тенденцию к самоочищению. Плутоний в своём четырехвалентном состоянии уже в течение нескольких суток на 70-80% отлагается в тканях печени человека и на 10-15% - в костных тканях. Плутоний, попавший в желудочно-кишечный тракт, менее ядовит, чем хорошо известные яды цианид или стрихнин. Поглощение 500 мг плутония как мелкоизмельченного или растворенного материала может привести к смерти (цианида хватило бы 100 мг) от острого облучения пищеварительной системы за несколько дней или недель. Вдыхание 100 мг плутония в виде частиц оптимального для удержания в лёгких размера ведёт к смерти от отека лёгких за 1-10 дней. Вдыхание дозы в 20 мг ведет к смерти от фиброза за 1 месяц. Для доз много меньших этих величин проявляется хронический канцерогенный эффект.

Полный коэффициент всасывания через кожу 0,02, но при площади открытых частей тела около 1800 см² суммарное количество может оказаться значительным. Плутоний диффундирует сквозь кожу и у работников сельского хозяйства, работающих на обработке земли.

Для хронического действия, плутоний должен долгое время присутствовать в организме человека. Вдыхание частиц подходящего для удержания в лёгких размера (1-3 микрона) ведёт к постоянному нахождению их там (детонация взрывчатки, не повлекшая за собой ядерный взрыв, может превратить 20-50% плутония в такую форму). Самая вероятная химическая форма, попадающая в тело, это оксид плутония. Оксид используется в реакторном топливе и частицы металлического плутония быстро окисляются на воздухе. Оксид почти нерастворим в воде.

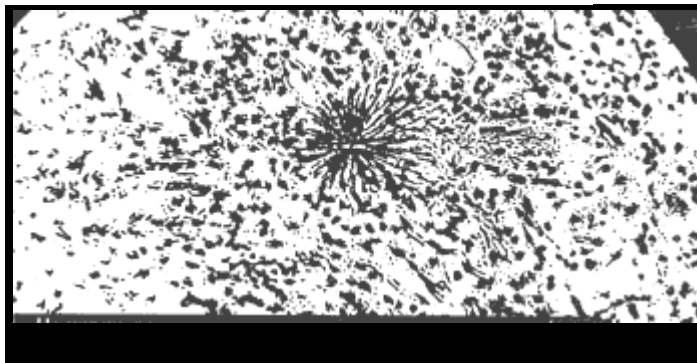
На протяжении всей жизни риск развития рака лёгких для взрослого зависит от количества попавшего в тело плутония. Приём внутрь 1 микрограмма плутония представляет риск в 1% развития рака (нормальная вероятность рака 20%), а 10 микрограмм увеличивают риск рака с 20% до 30%. Попадание 100 микрограмм или более гарантируют развитие рака лёгких (обычно через несколько десятилетий), хотя свидетельства повреждения лёгких могут появиться в течение нескольких месяцев.

Плутоний обычно содержится в биологических системах в степени окисления 4+, имея химическое сходство с Fe^{3+} . Если он проникнет в систему кровообращения, то с большой вероятностью начнёт концентрироваться в тканях, содержащих железо: костном мозге, печени, селезёнке. Организм путает плутоний с железом. Белок трансферина вместо железа забирает плутоний. В результате останавливается перенос кислорода в организме. Микрофаги растаскивают плутоний по лимфоузлам. Если 1.4 микрограмма разместятся в костях взрослого человека, в результате ухудшится иммунитет и через несколько лет может развиваться рак.

Попавший в организм плутоний выделяется медленно. Скорость выделения такова, что через 50 лет после попадания в организм остается 80% усвоенного количества. Период биологического полувыведения плутония 80-100 лет при нахождении в костной ткани, т.о. концентрация его там практически постоянна. Период полувыведения из печени - 40 лет. Хелатные добавки могут ускорить выведение плутония. Максимально допустимым содержанием плутония в организме считается такое количество, которое может находиться неограниченное время в организме взрослого человека, не причиняя ему вреда. В настоящее время эта величина для ^{239}Pu установлена равной 0,047 мккюри что эквивалентно 0,75 мкг.

Табл. 49. Физиологические характеристики изотопов плутония.

Радионуклид	Состояние радионуклида в соединении	Критический орган	ДС _А , Бк	ПДП, Бк/год	ДК _А , Бк/л
²³⁸ Pu	P	Кость	7,4·10 ²	88,8	3,7·10 ⁻⁵
	НР	Легкие	2,6·10 ²	1,6·10 ³	—
²³⁹ Pu	P	Кость	7,4·10 ²	77,7	3,3·10 ⁻⁵
	НР	Легкие	2,9·10 ²	1,7·10 ³	—
²⁴⁰ Pu	P	Кость	7,4·10 ²	77,7	3,3·10 ⁻⁵
	НР	Легкие	2,9·10 ²	1,7·10 ³	—
²⁴¹ Pu	P	Кость	1,4·10 ⁴	4,7·10 ³	1,7·10 ⁻³
	НР	Легкие	2,9·10 ⁵	1,8·10 ⁶	—
²⁴² Pu	P	Кость	8,1·10 ²	81,4	3,3·10 ⁻⁵
	НР	Легкие	2,9·10 ²	1,7·10 ³	—
²⁴³ Pu	P	ЖКТ (ВТК)	—	1,6·10 ⁸	66,6
	НР	ЖКТ (ВТК)	—	2,0·10 ⁸	—
²⁴⁴ Pu	P	Кость	1,7·10 ³	1,5·10 ²	5,9·10 ⁻⁵
	НР	Легкие	6,3·10 ²	2,9·10 ³	—



На снимке:
препарат ткани легкого - черная звезда в центре фотографии представляет собой след излучения от частицы плутония.

Международная комиссия по радиологической защите установила норму ежегодного поглощения на уровне 280 нанограмм. Это значит, что для профессионального облучения концентрация плутония в воздухе не должна превышать 7 пикокюри/м³. Максимально допустимая концентрация ²³⁹Pu (для персонала) 40 нанокури (0.56 микрограмма) и 16 нанокури (0.23 микрограмма) для легочной ткани.

Для ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴²Pu, ²⁴⁴Pu группа радиационной опасности А, МЗА = 3,7·10³ Бк; для ²⁴¹Pu, ²⁴³Pu группа радиационной опасности Б, МЗА = 3,7·10⁴ Бк.

Замечание. Активность минимально значимая (МЗА) - активность открытого источника ионизирующего излучения в помещении или на рабочем месте, при превышении которой требуется разрешение органов государственной санитарно-эпидемиологической службы на использование этих источников, если при этом также превышено значение минимально значимой удельной активности.

Радионуклид	Состояние радионуклида в соединении	Критический орган	ПГП, Бк/год		ДК _Б , Бк/л	
			через органы дыхания	через ЖКТ	в атмосферном воздухе	в воде
²³⁸ Pu	P	Кость	8,9	7,4·10 ⁴	1,2·10 ⁻⁶	92,5
	НР	Легкие	1,6·10 ²	—	—	—
²³⁹ Pu	P	ЖКТ (НТК)	—	4,1·10 ⁵	—	—
	P	Кость	7,8	6,7·10 ⁴	1,1·10 ⁻⁶	81,4
	НР	ЖКТ (НТК)	—	4,4·10 ⁵	—	—
²⁴⁰ Pu	P	Легкие	1,7·10 ²	—	—	—
	P	Кость	7,8	6,7·10 ⁴	1,1·10 ⁻⁶	81,4
	НР	Легкие	1,7·10 ²	—	—	—
²⁴¹ Pu	P	ЖКТ (НТК)	—	4,4·10 ⁵	—	—
	P	Кость	4,1·10 ³	—	5,9·10 ⁻⁵	—
	НР	Легкие	1,8·10 ⁵	—	—	4,1·10 ³
²⁴² Pu	P	ЖКТ (НТК)	—	2,04·10 ⁷	—	—
	P	Кость	8,1	7,0·10 ⁵	1,1·10 ⁻⁶	88,8
	НР	Легкие	1,7·10 ²	—	—	—
²⁴³ Pu	P	ЖКТ (НТК)	—	4,4·10 ⁵	—	—
	P	ЖКТ (ВТК)	1,6·10 ⁷	9,9·10 ⁶	2,2	1,3·10 ⁴
	НР	ЖКТ (ВТК)	2,0·10 ⁷	9,9·10 ⁶	—	—
²⁴⁴ Pu	P	Кость	15,2	1,3·10 ⁵	2,1·10 ⁻⁶	1,6·10 ³
	P	Легкие	2,9·10 ²	—	—	—
	НР	ЖКТ (НТК)	—	3,3·10 ⁵	—	—

Табл. 50. Гигиенические нормативы плутония (Категория А)
Критические органы для плутония – печень, скелет и лимфоузлы.

Периоды полувыведения промышленных соединений плутония из легких составляют 3 года и 7 лет для аэрозолей, содержащих плутоний в форме нитрата и диоксида. Период биологического полувыведения плутония из гонад – 300 суток, из печени – 30 лет, а из скелета – 80 лет. Хелатные добавки ускоряют выведение плутония. Молоко выводит плутоний в 2-10 раз активнее, чем

вода.

Плутоний достаточно опасен и соблюдать предосторожность при работе с ним надо.

11.2 Радиационная гигиена плутония

Особая роль плутония определяется его высокой удельной активностью (~62 Ки/кг для ^{239}Pu) и высокой радиотоксичностью. Согласно НРБ-76/87 допустимое содержание ^{239}Pu в скелете - органе основного депонирования радионуклида – у лиц категории Б (ограниченная часть населения) составляет ДКБ=0,1, ДКА=0,002 мкКи или 74 Бк, чему соответствует годовая эквивалентная доза облучения костной ткани 3 бэр.

В Нормах радиационной безопасности (НРБ-76/87) даны значения предельно-допустимых концентраций радиоактивных веществ в воде и воздухе для профессиональных работников и ограниченной части населения. Данные по некоторым важным, биологически активным радионуклидам приведены в **Табл. 51**.

Табл. 51. Значения допустимых концентраций для некоторых радионуклидов.

Нуклид	Период полураспада, $T_{1/2}$ лет	Допустимая концентрация, Ки/л		Допустимая концентрация	
		в воздухе	в воздухе	в воздухе, Бк/м ³	в воде, Бк/кг
^{226}Ra	1600	$8,5 \cdot 10^{-16}$	$5,4 \cdot 10^{-11}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	4,5
^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$	$2,2 \cdot 10^{-15}$	$5,9 \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^1$	$7,3 \cdot 10^{-1}$
^{239}Pu	$2,4 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-17}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$	5

Реакторный плутоний в 8-10 раз токсичнее, чем ^{239}Pu .

Предельно допустимая концентрация для ^{239}Pu в воздухе рабочих помещений составляет $3,3 \cdot 10^{-5}$ Бк/л ($1 \cdot 10^{-13}$ кюри/л, 20 расп/мин·м³). Максимально допустимое количество ^{239}Pu в теле человека не должно превышать нескольких десятых микрограмма.

В соответствии с Нормами радиационной безопасности, НРБ-95, дозовый коэффициент (ДК) при ингаляции плутония (для оксидов и других нерастворимых соединений) составляет ДК=9.3·10⁻⁵ Зв/Бк для населения, ДК=7·10⁻⁵ Зв/Бк для персонала, ДК=7.6·10⁻⁷ Зв/Бк при поступлении с водой и пищей. Эволюция норм для содержания плутония приведена в **Табл. 52**. В скобках приведены значения ДП(Н)=С_А*V, ДПВ(Н)=С_В*М, а также ДП(П)=С_{АР}*V_А.

	Персонал		Население		Население	
	САР	ДП(П)	С _А	ДП(Н)	С _В	ДПВ(Н)
НРБ-95	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^2$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^1$	1.6	$1.3 \cdot 10^3$
НРБ-76/87, НРБ-76	$3.3 \cdot 10^{-5}$	($8.25 \cdot 10^1$)	$1.1 \cdot 10^{-6}$	(8)	81	($6.5 \cdot 10^4$)
НРБ-333-60	$7.4 \cdot 10^{-5}$	($1.95 \cdot 10^2$)	$7.4 \cdot 10^{-7}$	(5.5)	1.85	($1.5 \cdot 10^3$)

Из данных **Табл. 52** следует, что допустимое содержание плутония в атмосферном воздухе практически сохранялось во всех НРБ на одном и том же уровне, возрастая от $0.74 \cdot 10^{-6}$ Бк/л в НРБ-333-60 до $1.5 \cdot 10^{-6}$ Бк/л в НРБ-95. Уровню С_А= $1.5 \cdot 10^{-6}$ Бк/л соответствует ДП(Н)=11 Бк/год и допустимая эффективная доза 10^{-3} Зв=0.1 бэр; - допустимое содержание плутония в воде в НРБ-95 и НРБ-333-60 находится на одном уровне, соответствующем ДПВ(Н)= $1.3 \cdot 10^3$ Бк/год и эффективной дозе в 10^{-3} Зв. В НРБ-76/87(76) допустимое содержание плутония в воде было в ~50 раз выше; допустимое содержание плутония в атмосфере рабочих помещений примерно одинаково в НРБ-95 и НРБ-333-60 (отличие в ~1.5 раз); при этом в НРБ-76/87(76) содержание плутония было в 3.3 раза меньше, чем в НРБ-95. НРБ-95 упорядочило и ужесточило нормы по содержанию плутония.

НРБ-99 сохранили эту тенденцию.

Международная комиссия по радиологической защите установила норму ежегодного поглощения на уровне 280 нанограмм. Это значит, что для профессионального облучения концентрация плутония в воздухе не должна превышать 7 пикоКи/м³. Максимально допустимая концентрация ^{239}Pu (для профессионального персонала) 40 наноКи (0.56 микрограмма) и 16 наноКи (0.23 микрограмма) для легочной ткани.

В **Табл.** для персонала для случая поступления радионуклидов с вдыхаемым воздухом приведены значения дозового коэффициента, допустимого годового поступления ПГП_{перс}, допустимой среднегодовой объемной активности ДОА_{перс}. Если химическая форма соединения радионуклида неизвестна, то следует использовать данные из **Табл.** для соединения с наибольшим значением величины дозового коэффициента и наименьшими значениями ПГП_{перс} и ДОА_{перс}.

Табл. 53. Значения дозовых коэффициентов, предела годового поступления с воздухом и допустимой среднегодовой объемной активности в воздухе отдельных радионуклидов для персонала (НРБ99).

Радионуклид	Период полураспада	Тип соединения при ингаляции	Дозовый коэффициент возд ϵ перс, Зв/Бк	Предел годового поступления ППП _{ПЕРС} , Бк в год	Допустимая среднегодовая объемная активность ДОО _{ПЕРС} , Бк/м ³
Pu-234	8,80 час	П	1,9-08	1,1+06	4,2+02
		М	2,2-08	9,1+05	3,6+02
Pu-235	0,422 час	П	1,5-12	1,3+10	5,3+06
		М	1,6-12	1,2+10	5,0+06
Pu-236	2,85 лет	П	1,8-05	1,1+03	4,4-01
		М	9,6-06	2,1+03	8,3-01
Pu-237	45,3 сут	П	3,3-10	6,1+07	2,4+04
		М	3,6-10	5,6+07	2,2+04
Pu-238	87,7 лет	П	4,3-05	8,9+01	3,7-02
		М	1,5-05	1,3+03	5,3-01
Pu-239	2,41+04 лет	П	4,7-05	7,8+01	3,2-02
		М	1,5-05	1,3+03	5,3-01
Pu-240	6,54+03 лет	П	4,7-05	7,8+01	3,2-02
		М	1,5-05	1,3+03	5,3-01
Pu-241	14,4 лет	П	8,5-07	4,1+03	1,7
		М	1,6-07	1,3+05	5,0+01
Pu-242	3,76+05 лет	П	4,4-05	7,4+01	3,1-02
		М	1,4-05	1,4+03	5,7-01
Pu-243	4,95	П	8,2-11	1,6+08	6,8+04
		М	8,5-11	2,0+08	8,5+04
Pu-244	8,26+07 лет	П	4,4-05	1,5+02	6,3-02
		М	1,3-05	1,5+03	6,2-01
Pu-245	10,5 час	П	4,5-10	4,4+07	1,8+04
		М	4,8-10	4,2+07	1,7+04
Pu-246	10,9 сут	П	7,0-09	2,9+06	1,1+03
		М	7,6-09	2,6+06	1,1+03

Табл. 54. Значения дозовых коэффициентов, величин предельного годового поступления с воздухом и пищей, допустимой объемной активности во вдыхаемом воздухе и удельной активности в воде отдельных радионуклидов для населения.

Радионуклид	Период полураспада	Поступление с воздухом				Поступление с водой и пищей			
		Критическая группа	Дозовый коэффициент,	Предел годового поступления,	Допустимая среднегодовая объемная активность,	Критическая группа ¹	Дозовый коэффициент,	Предел годового поступления,	Допустимая среднегодовая удельная активность в питьевой воде,
Pu-236	2,85 лет	6	2,0-5	5,0+1	6,2-3	2	2,2-7	4,5+3	1,6
Pu-237	45,3 сут	5	4,3-10	2,3+6	3,2+2	2	6,9-10	1,4+6	1,4+3
Pu-238	87,7 лет	6	4,6-5	2,2+1	2,7-3	2	4,0-7	2,5+3	6,0-1
Pu-239	2,41+4 лет	6	5,0-5	2,0+1	2,5-3	2	4,2-7	2,4+3	5,6-1
Pu-240	6,54+3 лет	6	5,0-5	2,0+1	2,5-3	2	4,2-7	2,4+3	5,6-1
Pu-241	14,4 лет	6	9,0-7	1,1+3	1,4-1	6	4,8-9	2,1+5	2,9+1
Pu-242	3,76+5 лет	6	4,8-5	2,1+1	2,6-3	2	4,0-7	2,5+3	5,8-1
Pu-244	8,26+7 лет	6	4,7-5	2,1+1	2,6-3	2	4,1-7	2,4+3	5,8-1
Pu-246	10,9 сут	5	9,1-9	1,1+5	1,5+1	2	2,3-8	4,3+4	4,2+1
Pu-236	2,85 лет	6	2,0-5	5,0+1	6,2-3	2	2,2-7	4,5+3	1,6
Pu-237	45,3 сут	5	4,3-10	2,3+6	3,2+2	2	6,9-10	1,4+6	1,4+3
Pu-238	87,7 лет	6	4,6-5	2,2+1	2,7-3	2	4,0-7	2,5+3	6,0-1
Pu-239	2,41+4 лет	6	5,0-5	2,0+1	2,5-3	2	4,2-7	2,4+3	5,6-1
Pu-240	6,54+3 лет	6	5,0-5	2,0+1	2,5-3	2	4,2-7	2,4+3	5,6-1
Pu-241	14,4 лет	6	9,0-7	1,1+3	1,4-1	6	4,8-9	2,1+5	2,9+1
Pu-242	3,76+5 лет	6	4,8-5	2,1+1	2,6-3	2	4,0-7	2,5+3	5,8-1
Pu-244	8,26+7 лет	6	4,7-5	2,1+1	2,6-3	2	4,1-7	2,4+3	5,8-1
Pu-246	10,9 сут	5	9,1-9	1,1+5	1,5+1	2	2,3-8	4,3+4	4,2+1

Напомним, что НРБ для целей нормирования поступления радионуклидов через органы дыхания в форме радиоактивных аэрозолей, их химические соединения разделены на три типа в зависимости от скорости перехода радионуклида из легких в кровь:

- тип "М" (медленно растворимые соединения): при растворении в легких веществ, отнесенных к этому типу, наблюдается компонента активности радионуклида, поступающая в кровь со скоростью $0,0001 \text{ сут}^{-1}$; для плутония – оксиды и диоксиды.

- тип "П" (соединения, растворимые с промежуточной скоростью): при растворении в легких веществ, отнесенных к этому типу, основная активность радионуклида поступает в кровь со скоростью $0,005 \text{ сут}^{-1}$; для плутония – иные кроме оксидов и хелатов.

Табл. 55. Минимально значимые удельная активность плутония (МЗУА) и его активность в помещении или на рабочем месте (МЗА)

Pu-234	1 E+02	1 E+07
Pu-235	1 E+02	1 E+07
Pu-236	1 E+01	1 E+04
Pu-237	1 E+03	1 E+07
Pu-238	1 E+00	1 E+04
Pu-239	1 E+00	1 E+04
Pu-240	1 E+00	1 E+03
Pu-241	1 E+02	1 E+05
Pu-242	1 E+00	1 E+04
Pu-243	1 E+03	1 E+07
Pu-244	1 E+00	1 E+04

Табл. 56. Допустимое радиоактивное загрязнение различных поверхностей (в частицах/см² в 1 минуту)

Объект загрязнения	α -излучающие радионуклиды (уран, плутоний, торий, нептуний, америций и др.)	β -излучающие радионуклиды (стронций-90, итрий-90, церий-144, рутений-106, цезий-137-бета, гамма и др.)
Кожные покровы тела человека, волосы и внутренняя поверхность головного убора	0,1	10
То же	0,1	2 (стронцием-90 и итрием-90)
Полотенца, нательное белье, внутренняя поверхность верхней одежды	0,1	10
То же	0,1	2 (стронцием-90 и итрием-90)
Верхняя одежда	0,5	20
То же	0,5	4 (стронцием-90 и итрием-90)
Наружные поверхности обуви	5	200
Внутренние поверхности обуви	0,5	20
То же	0,5	4 (стронцием-90 и итрием-90)
Внутренние поверхности жилых помещений и находящихся в них бытовых предметов	0,5	20
Наружные поверхности жилых и подсобных	5	200

помещений, предметов во дворе		
Внутренние поверхности транспортных средств и контейнеров	1	100
Мешковина, упаковочные материалы, внутренняя поверхность ящиков под пищевые продукты	Не допускается	Не допускается

Если органы дыхания как наиболее уязвимые для попадания аэрозолей плутония надёжно защищены, то его токсичное воздействие относительно невелико: из желудочно-кишечного тракта он практически не усваивается (коэффициент перехода от 10^{-4} до 10^{-5} для разных форм Pu), а через кожные покровы, которые одновременно задерживают α -излучение изотопов ^{238}Pu - ^{240}Pu , этому элементу очень трудно проникать.

Табл. 57. Максимальные значения безопасных концентраций различных изотопов плутония.

Изотоп	E_{α} , МэВ	Максимально допустимые концентрации				Предельно допустимое поступление в организм	
		в воде		в воздухе		мкКи	мкг
		мкКи/мл	мкг/мл	мкКи/мл	мкг/мл		
^{238}Pu	5,50	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	0,04	$2,32 \cdot 10^{-3}$
^{239}Pu	5,16	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$3,2 \cdot 10^{-11}$	0,04	0,653
^{240}Pu	5,17	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$9 \cdot 10^{-12}$	0,04	0,176
^{241}Pu	(4,90)	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-11}$	$1,7 \cdot 10^{-14}$	0,9	$9,08 \cdot 10^{-3}$
^{242}Pu	4,90	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$5,1 \cdot 10^{-10}$	0,05	0,131
^{244}Pu	4,58	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	0,04	$2,26 \cdot 10^{-6}$

11.3 Охрана труда

При работе с плутонием и его соединениями следует соблюдать особую осторожность, что обусловлено следующими факторами:

1. Металлический плутоний и некоторые его сплавы пирофорны.
2. Изотопы плутония являются источниками интенсивного α -излучения или образуют (например, ^{241}Pu) α -излучающие дочерние продукты (^{241}Am).
3. При работе с большими количествами делящихся изотопов плутония (например, ^{239}Pu) при определённых условиях может быть достигнуто критическое состояние.

При работе с большими концентрациями плутония необходимо принимать меры по предотвращению превышения критической массы или критических размеров. При этом следует учитывать, что критическая масса ^{239}Pu в три раза меньше, чем у ^{235}U . Плутоний склонен к самонагреву и способен проплавить или разорвать окружающую его оболочку. Надо тщательно следить за формой изделия и избегать компактных форм типа сфер. Важно понимать, что критическая масса плутония в растворе намного меньше, чем в твёрдом состоянии. Конечно, просто так устроить ядерный взрыв не удастся, но расплавление и фрагментация изделия вполне возможны. При этом даже незначительное превышение критической массы вызовет смертельную дозу радиации, что и случилось пару раз в разных странах.

Обычно в лабораторных условиях критическая масса не достигается. Однако при работе со значительными количествами плутония следует ограничиваться менее 200 г ^{238}Pu и ^{239}Pu («двойной запас»). Если всё же необходимо использовать количество плутония, превышающее критическую массу, то можно предотвратить достижение критического состояния с помощью нейтронных ядов (В, Cd, сосудов из боратного стекла) или геометрически безопасного оборудования.

При работе с плутонием в лаборатории необходимо принять следующие меры предосторожности.

Работы с плутониевыми материалами необходимо проводить в боксе, выдерживающим помимо атмосферного давления разрежение до 25 мм водяного столба, причём использовать хирургические перчатки с длинными рукавами. Отходящий из бокса воздух следует пропускать через противопылевые фильтры. При работе со значительными количествами ^{239}Pu боксы нужно защищать плексигласовыми экранами толщиной 10 см. Поскольку ^{239}Pu диффундирует через резиновые перчатки, следует использовать специальные, покрытые слоем гипалона. При работе с ^{241}Pu боксы следует огородить со всех сторон свинцовыми экранами с толщиной стенок 3-4 мм и использовать окна, изготовленные из свинцового стекла толщиной 6-7 мм, а также радиационностойкие перчатки.

При хранении растворов плутония в плотно закрытых сосудах следует учитывать образование газов - продуктов радиолиза воды. Для предупреждения разрыва сосудов их периодически открывают; иногда они снабжаются предохранительными клапанами.

Следует особо обратить внимание на то, что в лабораториях, где проводятся работы с плутонием, должна соблюдаться исключительная чистота. Воздух и сточные воды необходимо ежедневно проверять на α -активность и регулярно проводить медицинское обследование персонала. При входе в лаборатории должны быть установлены приборы дозиметрического контроля для проверки рук и ног сотрудников на α -активность и предусмотрены специальные помещения для смены одежды. Защитная одежда состоит из плотно застегивающегося лабораторного халата, колпака, хирургических резиновых перчаток и специальной обуви. Во время работы в боксах в лаборатории должно находиться не менее двух человек.

Поскольку обычно плутоний испускает только α -активность (имеющую очень небольшую среднюю длину пробега), защиты от излучения при работе с плутонием не требуется. Однако если плутоний получил дозу облучения в реакторе, большую, чем необходимо для получения ^{239}Pu , то в нем могут содержаться изотопы с высокой γ -активностью. Сильно облученный плутоний нельзя обрабатывать в горячих камерах, предназначенных для работы с облученным ураном, так как такие камеры недостаточно герметичны и может происходить утечка аэрозолей с α -активностью. Поэтому для работы облученным плутонием, требуются специальные горячие камеры, защищающие исследователей от α -, β - и γ излучений. Дозы рентгеновых и γ -излучений умеренной интенсивности, испускаемых плутонием, подвергнутым облучению промежуточными дозами нейтронов, достаточны для значительного увеличения содержания высших изотопов плутония, но недостаточны для образования заметных количеств продуктов деления. Сплавы, соединения и растворы, содержащие плутоний вместе с лёгкими элементами, например бериллием, могут довольно интенсивно испускать нейтроны по реакции (α , n), создавая этим опасность для здоровья персонала.

Неотложная помощь при аварийном поступлении растворимых соединений плутония в лёгкие состоит в промывании носоглотки и полости рта водой; лечебные ингаляции 5% раствором пентацина. Рекомендованы промывание желудка, слабительные, очистные клизмы, дезактивация кожных покровов мыльным раствором препаратом "Защита". При глубоких колотых ранах - иссечение загрязненных участков.

Несмотря на принимаемые меры борьбы с загрязненностью лабораторного оборудования, иногда необходимо проводить его дезактивацию. В качестве дезактивирующих растворов применяют минеральные кислоты, соду, соли лимонной и щавелевой кислот и комплексоны

Недостаток жидких методов дезактивации - образование значительных объемов жидких радиоактивных отходов. Альтернативой жидкостным методам является сухая дезактивация, основанная на использовании различных пленкообразующих композиций. Использование дезактивирующих и локализирующих пленок позволяет уменьшить объемы радиоактивных отходов и повысить уровень безопасности проведения работ. Наиболее эффективно сухие методы можно использовать при дезактивации больших поверхностей с загрязнениями преимущественно адгезионного характера. Используемые в радиохимических производствах пленкообразующие композиции на основе водных растворов поливинилового спирта медленно формируют пленки, что увеличивает время проведения работ по дезактивации и локализации загрязнений. Введение комплексонов приводит к повышению эффективности дезактивации. Самым малым временем формирования защитных пленок обладает композиция состава: 10% поливинилбутираля, 1% глицерина, 3-4% фосфорной кислоты, 12-13% воды. Такие композиции эффективны как при удалении плутония, так и продуктов деления.