

РАДИАЦИОННИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ЕКСПЛОАТАЦИЯТА И ИЗВЕЖДАНЕТО ОТ ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА ЯДРЕНИ СЪОРЪЖЕНИЯ

Костадин Зашев, Калин Филипов

В статията са разгледани радиационните въздействия върху човека, които могат да се получат в процесите на експлоатация и извеждане от експлоатация на ядрени съоръжения. Представени са последствията от малките и големите дозови натоварвания и е разгледана взаимовръзката между радиационното въздействие и вероятността от възникване на стохастични и детерминистични ефекти..

RADIATION EFFECTS DURING OPERATION AND DECOMMISSIONING OF NUCLEAR FACILITIES

Kostadin Zashev, Kalin Filipov

In the article are discussed the radiation effects on humans, which can be obtained during the process of commissioning and decommissioning of nuclear facilities. The effects of small and large dose rates and examined the relationship between radiation influence and the probability of stochastic and deterministic effects are presented.

Въведение

Експлоатирането на ядрени съоръжение неизбежно е свързано с дадени радиационни рискове. Това се отнася както за енергийните ядрени съоръжения, така и за изследователските, медицински, дефектоскопски и други приложения. Въпреки, че ядрената индустрия е сравнително млада, работата с подобни съоръжения вече е добре усвоена и съществува ясна регулаторна рамка.

Извеждането от експлоатация на ядрените съоръжения след изтичане на експлоатационния им срок е един неизбежен и необходим етап от жизнения им цикъл. В повечето случаи представлява един дълго подготвян процес, за който са заделени финансови ресурси по време на експлоатацията. В някои случаи обаче се налага извеждане от експлоатация в момент, значително изпреварващ крайния срок на експлоатационния живот на съоръженията. При възникването на подобна ситуация е от особена важност вземането на правилни решения относно методите за извеждане от експлоатация, за да може да се осигури възможно най-ефикасното решение от гледна точка на цена, социален фактор и най-важното – гарантиране на безопасна работа и опазването на околната среда.

На площадката на АЕЦ Козлодуй има инсталирани шест реактора, като през 1999 година българското правителство поема ангажимент към Европейската комисия за затваряне и извеждане от експлоатация на първите четири (ВВЕР-440/В230) във възможно най-кратки срокове и днес сме изправени пред въпроса за тяхното извеждане от експлоатация. Ядрената енергетика е един сравнително млад отрасъл на промишлеността.

Извеждането от експлоатация на промишлени съоръжения е свързано с редица рискове, както за персонала, така и за околната среда. Извеждането от експлоатация на ядрените съоръжения добавя още една категория риск – вероятността дозово натоварване на работниците и от радиационно замърсяване на околната среда. Тези особености съществуват и по време на нормалната експлоатация и ремонтните дейности на съоръженията, но по време на извеждането от експлоатация те са комбинирани с фактори

като разрушаване на сградни структури и съоръжения, наличие на азбест и други вредни среди, работа на високо или в опасни среди и т.н., като в някои случаи рисковете се увеличават и налагат по-внимателно отношение.

Извеждането от експлоатация на ядрените съоръжения може да се осъществи основно по три метода, характеризиращи се с различни дозови натоварвания и различни продължителност, цена и риск за околната среда. Това са методът на

Таблица 1. Основни методи за извеждане от експлоатация на ядрени съоръжения

Незабавен демонтаж (DCON)	Безопасно съхранение (SAFSTOR)	Погребване (Entomb)
Оборудването, сградите и съоръженията, които са радиоактивно замърсени, се обработват и почистват до нива, които позволяват освобождаване от регулаторен контрол. Процесът е непосредствено след спиране на експлоатацията.	Съоръженията се привеждат в стабилно безопасно състояние за определен период от време, след което оборудването, което е радиоактивно замърсено, се обработва и почиства до нива, които позволяват освобождаване от регулаторен контрол.	Радиоактивните структури и съоръжения се покриват с устойчиви, дългоживущи субстанции и материали. Съоръженията остават под физическа охрана и контрол докато радиоактивното излъчване не се понижи до нива, неподлежащи на регулаторен контрол.

Радиационни въздействия върху живите организми

Въздействието между заредените частици и атомите е свързано с промяна на състоянието на атома и съответно увеличаване на температурата на материала, който той изгражда. По този начин цялата енергия, предадена на биологичната тъкан чрез йонизиращата радиация се разсейва като топлина чрез увеличени вибрации на атомите и молекулите. На практика вредният биологичен ефект се получава от първоначалната йонизация и получените в резултат на нея химически промени.

Основната единица на биологичната тъкан е клетката, която има контролен център наречен ядро. Около 80% от клетката се състои от вода, а останалите 20% са комплексни биологични съставляващи. Когато йонизираща радиация премине през клетъчна тъкан, тя произвежда заредени водни молекули, при което могат да се получат свободни радикали – високо реактивни химикали, които могат да променят важни молекули в клетката. Една такава молекула е дезоксирибонуклеинова киселина (ДНК), намираща се главно в ядрото на клетката. ДНК контролира структурата и функционирането на клетката. Повечето от начините, по които радиацията уврежда клетките, включват изменение на ДНК. Има два начина по които това може да стане – радиацията може да йонизира ДНК молекула, водейки директно до химична промяна или ДНК може да бъде изменена косвено при взаимодействието със свободен радикал, получен във водата на клетката в резултат на радиацията. И в двата случая химичната промяна може да доведе до вреден биологичен ефект водещ до развитието на ракови образувания или наследствени генетични дефекти.

Най-важното свойство на различните видове йонизираща радиация е тяхната способност на проникват в материята. Дълбочината на проникването за определен тип радиация се увеличава с нейната енергия, но варира от един тип радиация до друг за едно и също количество енергия. При заредени частици като α и β -частици, дълбочината на проникване също зависи от масата на частицата и нейния заряд. За еднакви енергии, β -частица ще проникне до по-голяма дълбочина от α -частица, докато α -частицата може само минимално да проникне във мъртвия, външен слой на човешката кожа, следователно радионуклидите, които ги изпускат не са опасни, освен, ако не попаднат в организма чрез

вдишване, поглъщане или наранена кожа. От своя страна β -частиците проникват на около сантиметър в тъканите, което означава, радионуклидите, които ги изпускат, са опасни за повърхностните тъкани, но не и за вътрешните органи (освен ако не попаднат в организма). За косвените, недирикти йонизиращи лъчения, като γ -лъчи и неутрони, степента на проникване зависи от природата на взаимодействие с тъканите, но тъй като те могат да преминат през тялото, радионуклидите, които ги изпускат, може да бъдат опасни независимо дали облъчването е външно или вътрешно

Дозови натоварвания и радиационни ефекти

Радиационни дози с различна големина доставени на различни части от тялото могат да окажат различни ефекти върху организма по различно време. Много висока доза получена от цялото тяло може да причини смърт в рамките на седмици. Например, погълната доза от 5 gray или повече получена мигновено най-вероятно би била фатална, заради увреждането на костния мозък и стомашно-чревния тракт, освен ако не се предприеме някакво лечение.

Таблица 2. Граници на ефективната доза според различни регулаторни органи

	IAEA International Atomic Energy Agency	ICRP International Commission on Radiological Protection	EU	България
Население	≤ 1 mSv/yr	≤ 1 mSv/yr	≤ 1 mSv/yr	≤ 1 mSv/yr
Работници (над 18 години)	≤ 20 mSv за година	≤ 20 mSv за година	≤ 100 mSv в продължение на 5 последователни години	≤ 100 mSv в продължение на 5 последователни години, като максималната ефективна доза за всяка година не може да надхвърля 50 mSv.

Адекватно медицинско лечение може да спаси живота на човек изложен на 5 gray, но доза за цялото тяло, да речем от 50 gray, почти сигурно ще бъде фатална, дори и при медицинска намеса. Много висока доза получена от малка област от тялото може да не се окаже фатална, но могат да възникнат други ранни ефекти. Например, моментално погълната доза от 5 gray от кожата най-вероятно би предизвикала еритемия (болезнено зачервяване на кожата) в рамките на седмица, но подобна доза на репродуктивните органи би причинила стерилност. Тези типове ефекти се наричат **детерминистични** ефекти: те се появяват само тогава, когато дозата или дозовото натоварване е по-голямо от определена прагова стойност, а ефектът се появява по-рано и е толкова по-силно изразен, колкото е по-голяма дозата. Съществуват обаче и детерминистични ефекти, които се появяват дълго време след излагане на лъчението и обикновено не са фатални. Най-добре познатите примери са катаракта (непрозрачност в лещите на окото) и увреждане на кожата (изтъняване и язви).

Ако дозата е по-малка или ако е получавана през по-дълъг период от време, има много голяма вероятност клетките на тялото да се възстановят и да не се появят ранни признаци на дадена болест. Дори и при такъв случай, тъканите биха могли все още да са повредени и ефектите да възникнат по-късно през живота на индивида (десетилетия по-късно) или дори при бъдещето поколение на заразения човек. Тези типове ефекти се наричат **стохастични** или вероятностни ефекти: за тях не е сигурно, че ще възникнат, но вероятността това да се случи се увеличава с увеличаване на дозата. Особеното тук е, че времето на поява и сериозността на ефектите не зависят от дозата. Тъй като радиацията не е единствената позната причина за повечето от тези ефекти е почти невъзможно да се определи клинично дали индивидуален случай е резултат от радиационно излагане или не.

Индуциране на ракови заболявания

Най-важният от стохастичните ефекти е рака, който винаги е сериозен и често фатален. Въпреки, че точната причина за повечето форми на рак остава неизвестна или слабо разбрана, излагането на агенти като цигарен дим, азбест и ултравиолетова радиация, както и йонизиращата радиация, се знае, че играят роля в индуцирането на определени форми на рак. Развитието на рак е комплексен, многоетапен процес, който обикновено отнема много години. Радиацията обикновено играе роля още на начален етап чрез нанасяне на определени мутации в ДНК на нормалните клетки и тъкани, като тези мутации позволяват на клетката да започне процес на аномален растеж, който понякога може да доведе до развитието на злокачествено заболяване.

Изхождайки от това, че не можем да направим разлика между случаите на рак, получени от радиационно лъчение и тези получени в резултат на други причини, се използва епидемиология – статистическо проучване на случаи (броя на случаите и тяхното разпределение) на специфично заболяване при определени групи от населението. Като се предполага, че знаем броя на хората в заразената група и дозите, които са получили, чрез наблюдение на случаите с рак в тази група и сравнявайки ги с дозите и случаите на рак, очаквани в подобна, но необлъчвана група, можем да оценим възникналия риск за рак към единица доза. Това често се нарича *рисков фактор*. Особено важно при провеждане на подобни анализи е да се включи информация за големи групи от хора, за да се минимизира статистическата несигурност в оценките.

Не всички случаи на рак са фатални. Средната смъртност от рак на щитовидната жлеза, предизвикан от радиационно лъчение, е около 10%, от рак на гърдите е около 50%, от рак на кожата е 1%. Общият риск от индуциране на рак при облъчване от нееднородно лъчение на цялото тяло е около половината от големината на риска от индуциране на фатална форма на рак. В радиационната защита риска от фатална форма на рак е от по-голямо значение, заради крайната си важност. Използването на рисковите фактори за фаталните форми на рак правят по-лесно сравняването им с другите фатални рискове, които се срещат в живота, докато сравнение на нефаталните рискове представлява затруднение.

Рискови фактори за възникване на ракови заболявания

Повечето от оцелелите от атомните бомбардировки в Япония и други изследвани групи, подложени на облъчване, са получили високи дози за кратък период от време. Изследването на разпространението на раковите заболявания в тези групи, отчитайки получените дози, показва че, при високи дози и дозови натоварвания съществува линейна връзка между дозата и риска.

В практиката обаче основната част от радиационните облъчвания включва ниски дози за дълги периоди. При подобен род облъчване изследванията за честотата на възникване на ракови заболявания не могат да предоставят достоверно доказателство за връзката между доза и риск, защото броя на случаите на рак над нормалното, който може да бъде очакван в резултат на радиационното облъчване, е прекалено малък, за да бъде изследван (сравнен с общия брой на случаите на рак в населението).

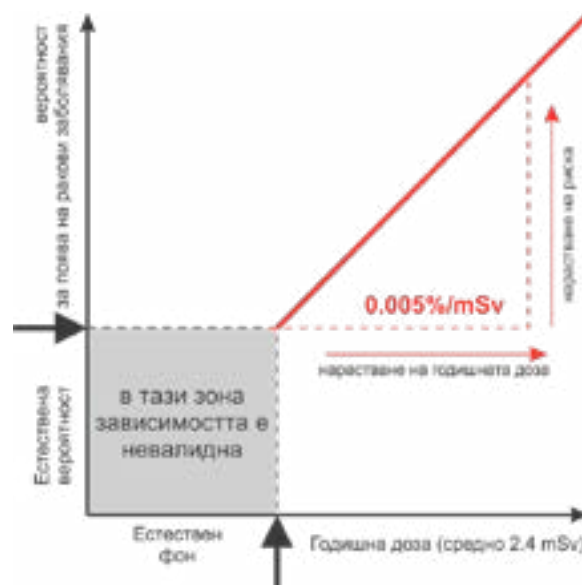
Поради тези причини е възприет друг подход за изследване на ефектите от радиацията върху клетките и организмите при съставяне на връзката между дозата и риска.

От години съществува едно мнение, възприето в световен мащаб, че връзката между дозата и риска има линейна форма, непрекъсната и за ниските дози до нулева стойност (известна като линейна безпрагова хипотеза). Това означава, че всяка една радиационна доза може да има пагубен ефект, независимо от това колко е малка.

Някои радиобиологични експерименти обаче водят до предположението, че ниските дози на радиация нямат пагубен ефект, тъй като тялото може ефективно да възстанови щетите, причинени от радиацията или дори, че ниските дози радиация могат да стимулират регенеративните процеси в клетките до такава степен, че да помогнат за предотвратяването на рак. Други експерименти са използвани като основа на теориите, че ниските дози

радиация са по-опасни (на единица доза) от високите или че наследствените увреждания причинени от радиацията могат да стават все по-тежки от поколение на поколение.

След обстоен преглед на биологичните ефекти от ниските дози йонизираща радиация, UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) стига до заключението, че „... увеличението на риска от рак пропорционално на радиационната доза остава постоянно с развиването на науката и остава, съответно, най-научно защитимото приближение за връзката между ниските дози и риска.“. Също така се допълва и че „... строго линейна връзка между дозата и риска не трябва да се очаква при всякакви обстоятелства“.



Фигура 1. Линейна безпрагова зависимост

За някои типове силна йонизираща радиация като α -частиците, рисковият фактор е същия за малките дози както и за големите. За по-слаби йонизиращи лъчения като γ -лъчите има значителни радиобиологични доказателства, че зависимостта е много по-сложна. За тези типове радиация линейната хипотеза е добро представяне на връзката между малките дози и големите дози към риска, но риска за единица доза (кривата на линейната хипотеза) е по-малък за ниските дози в сравнение с високите.

В действителност риска за човек при определена доза ще зависи и от възрастта на този човек по време на облъчването с радиация, а също така и от неговия пол. Например, ако човек получи доза късно през живота си, то този човек може да почине поради друга причина още преди да се развие рак вследствие на облъчването. Също така рискът от рак на гърдите е практически равен на нула при мъжете и два пъти повече от средната стойност 0.4×10^{-2} или 1 на 250 за жените. В допълнение последните научни открития показват, че риска от рак след облъчване може да бъде повлиян и от генетичния 'състав' на даден човек. Към настоящия момент можем да определим само изключително редки случаи на хора и фамилии, които носят повишен риск, но в бъдеще експертите ще са в състояние да вземат под внимание такива наследствени характеристики.

Рисковите фактори се различават и за различното население. Това е основно, защото различното население има различно разпределение на възрастта. Например, тъй като средната възраст на работещата част от населението е принципно по-висока (следователно тяхната очаквана продължителност на живота е по-ниска) в сравнение с населението като цяло, рисковия фактор на последните е доста по-нисък от този на работещите. Международната комисия по радиационна защита оценява рисковия фактор за работещото население на около 4×10^{-2} . Различните рискови фактори могат да бъдат в резултат и от различия в преобладаващата честота на регистриране на различни форми на рак от

всякакви причини, защото риска от радиация се възприема, че е свързан с тази преобладаваща честота. Например, рисковият фактор за страни с относително високи нива на смъртност от рак (развитите страни) ще бъде по-висок от стойностите му за страни, където раковите заболявания са по-рядко срещани (развиващите се страни). Такива различия обаче са сравнително малки в сравнение с несигурността в рисковите фактори като цяло и затова тези стойности, които се основават на характеристиките на 5 коренно различни населения могат да бъдат логично използвани в международен план.

Таблица 3. Рискови фактори на МКРЗ за цялото население

Тъкан или орган	Рисков фактор (10^{-2} Sv^{-1})
Пикочен мехур	0.30
Костен мозък	0.50
Костни тъкани	0.05
Гърди	0.20
Дебело черво	0.85
Черен дроб	0.15
Бял дроб	0.85
Хранопровод	0.30
Яючници	0.10
Кожа	0.02
Стомах	1.10
Щитовидна жлеза	0.08
Други	0.50

Оценка на риска

Главният източник на информация за допълнителния риск за възникването на ракови заболявания, вследствие излагането на цялото тяло на γ -лъчение, са изследвания на оцелелите от атомните бомбардировки в Хирошима и Нагазаки през 1945 година. Тъй като значителен брой хора, оцелели при бомбардировките са живи и днес, е необходимо да се предскаже колко случаи на рак евентуално ще бъдат открити в облъченото население. За целта са използвани различни математични модели, но това неизбежно е още един източник на неточност при оценка на риска. Допълнителна неточност в анализите се получава и от факта, че е невъзможно да бъдат определени точно дозите, получени от оцелелите.

Други оценки на риска от излагане на различни органи и тъкани на γ - и рентгенови лъчи идват от хората, изложени на външно облъчване чрез медицински процедури с диагностична цел за различни състояния, както и от населението на Маршалските острови, изложени на атмосферното замърсяване в резултат от тестовите с ядрено оръжие. Информация за ефектите от α -изпускащи радионуклиди идват и от миньори, изложени на облъчването на радона и неговите дъщерни продукти, от работници, изложени на облъчването от радий-226 в отразяващите бои, от някои пациенти, лекуващи се от заболявания на костите с радий-224 и други.

Информация от това естество е оценявана периодично от UNSCEAR и от Международната Комисия по Радиационна Защита (ICRP) с цел да се направят най-адекватни оценки на рисковете. В случая на Международната Комисия по Радиационна Защита (ICRP), тези рискови оценки са развити с цел разработване на препоръки за защита. Освен това, МААЕ изгражда свои стандарти за радиационна безопасност, взимайки под внимание съветите на UNSCEAR и ICRP.

Колективен риск

Важно последствие на приемането, че риска е пропорционален на дозата е това, че колективната ефективна доза става показател на комуналната (общата) вреда. При тази концепция няма никаква аритметична разлика дали в общество от 50 000 човека всеки получава ефективна доза от 2 mSv или в общество, състоящо се от 20 000 човека, всеки получава 5 mSv. И в двата случая колективната доза е 100 manSv и платената цена ще бъде около 5 смъртни случая от рак и един тежък наследствен дефект в следващо поколение. Членове на по-малко общество изпитват по-голям индивидуален риск от фатална форма на рак.

Наследствени увреждания

Освен раковите заболявания съществуват и други основни късни ефекти от радиацията. Такива могат да бъдат наследствените увреждания, при които, подобно на раковите заболявания, вероятността, но не и сериозността, зависи от дозата. Генетичните увреждания произхождат от облъчване на тестисите и яйчниците. Йонизиращата радиация е причина за мутации в тези клетки или в зародиша им, който ги формира. Това представляват мутации, които могат да доведат до поява на генетично увреждане в бъдещи поколения. Мутациите се появяват като резултат от структурни промени в ДНК в единични зародишни клетки, които впоследствие пренасят наследствената информация от ДНК и през следващи поколения. Наследствените заболявания, които могат да бъдат причинени от радиацията, могат да бъдат от относително незначителни скелетни аномалии и по-маловажни метаболитни смущения до ранна смърт и сериозни ментални увреждания.

Въпреки, че мутациите се появяват в живите организми без видима причина, естествената радиация, както и различни вещества в околната среда, могат да предизвикват възникването им и да допринесат за честата поява на наследствени увреждания. Няма окончателни и убедителни доказателства в човешките потомства за наследствени увреждания, които да могат да се отдадат на облъчването от естествена или изкуствена радиация. Разширени изследвания на потомците на оцелелите от атомните бомбардировки в Япония не са доказали еднозначно съществуването на връзка между облъчването и появата на наследствени увреждания.

Провеждани са големи експериментални изследвания за оценка на наследствените увреждания от йонизираща радиация при животни, предимно мишки. Тези изследвания са покрили широк спектър от дозови натоварвания и ясно демонстрират, че йонизиращата радиация наистина причинява мутации. Резултатите също така са показали и колко често наследствените увреждания са се пораждали от известни дози. Стига се до извода, че тази информация ни позволява да оценим наследствените рискове и при хората.

Международния Комитет по Радиологична Защита оценява риска за сериозността на наследствените увреждания при обикновено население изложено на ниски дози. Тя оценява рисковия фактор на $1.0 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ при такива увреждания, появяващи се по всяко време при всички бъдещи поколения. Мутации, които водят до заболявания, които са строго наследствени като хемофилия или синдром на Даун, се явяват половината от уравнението. Останалата част е съставена от т.нар. група *многообразни заболявания*, като диабет и астма. Оценката на риска носи значителна неточност именно за тези многообразни заболявания, при които взаимодействието между генетичните и естествените фактори, които повлияват тези заболявания, е слабо разбрана.

Облъчването на тестисите и яйчниците носи риск само за наследствени увреждания, ако се случи преди или по време на репродуктивния период на индивида. Тъй като частта на работещото население, за която е вероятно да се възпроизвежда е по-малка на тази при обикновеното население, рисковия фактор за работници съответно е по-малък.

Заклучение

Проведените изследвания недвусмислено показват, че радиационното въздействие върху живите организми крие съществени рискове. Трябва обаче да се подхожда внимателно при провеждане на оценките на въздействието на ниските стойности на дозите, тъй като не могат да се намерят убедителни доказателства за тяхното вредно въздействие, а често става въпрос дори и за обратното – възможни положителни ефекти от ниските радиационни въздействия.

Литература:

- [1] Clearance Levels for Radionuclides in Solid Materials: Application of Exemption Principles; Interim Report for Comment, IAEA-TECDOC-855, 1996
- [2] Decommissioning costs of WWER-440 nuclear power plants, IAEA-TECDOC-1322, 2002
- [3] Nuclear safety and the environment – Environmental Impact Assessment for the Decommissioning of Nuclear Installations, B4-3040/99/MAR/C2 by Cassiopee, University of Wales and ECA Global. EUR 20051, 2001.
- [4] The decommissioning of WWER type nuclear power plants, IAEA-TECDOC-1133, 2000
- [5] Radiation, people and environment, IAEA, 2004.
- [6] Radiation and Health, T.Henriksen, H. Maillie, Taylor & Francis, 2003
- [7] Радиационният хормезис при човека, Г. Василев, София 2012.
- [8] Радиация, жизнена среда, човек, ядрена енергетика, Г. Василев, Сл. Ушев, София, 2010.

Автори:

Маг.инж. Костадин Димитров Зашев, Технически Университет – София, катедра Топло и ядрена енергетика, k_zashev@mail.bg

Доц. д-р Калин Боянов Филипов, Технически Университет – София, катедра Топло и ядрена енергетика, 02/965 2297, filipov@tu-sofia.bg.