



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta
Katedra aplikované fyziky a techniky

Diplomová práce
**Havárie v jaderné elektrárně Černobyl:
seriál a skutečnost**

Vypracoval: Bc. Štěpán Rod
Vedoucí práce: Mgr. Pavel Černý, Ph.D.

České Budějovice, 2024



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

University of South Bohemia in České Budějovice
Faculty of Education
Department of applied physics and technology

Diploma thesis
**Chernobyl nuclear power plant accident:
series and reality**

Author: Bc. Štěpán Rod
Supervisor: Mgr. Pavel Černý, Ph.D.

České Budějovice, 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích

Podpis

Poděkování

Mé poděkování směřuje v první řadě vedoucímu práce, panu Mgr. Pavlovi Černému, Ph.D. za trpělivost, odborné vedení, a podnětné rady. Poděkovat bych chtěl rovněž mé rodině, která mi byla oporou v náročných chvílích během celého mého studia.

Abstrakt

Tato diplomová práce porovnává seriál Černobyl společnosti HBO s realitou. Nejprve jsou zde však vysvětleny všechny odborné pojmy, jednotky a veličiny potřebné pro následnou komparaci. Poté se věnuje účinkům ionizujícího záření na živou hmotu. Vysvětluje účinky záření na buňku a všechny možné projevy poškození lidského organismu v závislosti na čase a velikosti dávky ozáření. Pro následnou úspěšnou komparaci je klíčové vysvětlení funkce polovodičových součástek a jaký vliv na jejich funkci má ionizující záření. Nedílnou součástí je také samotná jaderná elektrárna Černobyl. Práce se za-bývá popisem lokace elektrárny a všech jejích důležitých částí. Stěžejní částí celé elektrárny je reaktor RBMK – 1000. Je popsán celý princip jeho fungování. Pro uvedení do souvislostí je důležité pochopení, co vše se vlastně v osudný den 26. dubna 1986 ode-hrálo ve velící místnosti elektrárny. Popis všech rozhodnutí provedených obsluhou reaktoru a jejich důsledky vedoucí nevyhnutelně k osudné katastrofě jsou popsána v další části. Důležitá je také zmínka o následcích havárie a jejím vlivu na zbytek světa. Svou odborností by měla tato práce korespondovat s technickým zaměřením autora. Cílem práce je komparace vybraných událostí, které nám nějakým způsobem seriál prezentuje, ale ve skutečnosti byl jejich průběh odlišný. Hlavní činností autora bylo takové situace v seriálu vyhledat, uvést jejich rozpor s realitou a popsat jejich skutečný průběh. Pro tyto potřeby byla vybrána prvotní havarijní opatření po výbuchu a zejména způsob jejich pro-vedení. Dalším rozporem byla velikost možné druhotné exploze a s tím související hroz-ba protavení koria a způsob jeho ochlazení. Seriál se s realitou rozchází také v případě likvidace grafitových trosek nacházejících se na střeše reaktoru třetího bloku. Ve společné části nazvané vliv ozáření na lidský organismus, jsou vysvětleny tyto rozpory. Průběh akutní nemoci z ozáření u jednoho z hasičů. Osud lidí ze železnič-ního mostu a skutečný význam igelitových stanů v nemocnici. Výsledkem práce je po-sudek, do jaké míry jsou odlišnosti mezi seriálem a realitou na tolik směrodatné, aby ovlivnili jeho celkový význam pro společnost a možné využití ve školství. Závěr je tedy takový, že seriál velmi věrně zpracoval černobylskou havárii. Nicméně v některých pří-padech neuvádí kompletní informace, nebo v přesném chronologickém pořadí, jak se skutečně staly. Jako je například havárie vrtulníku. Tyto informace lze ale jednoduše doplnit, nebo dovysvětlit. Jedinou vážnější chybou je tak velikost druhotné exploze, kterou je třeba uvést na pravou míru. Z těchto závěrů vyplývá, že seriál by po doplnění informací mohl být i velmi zdařilou pomůckou pro výuku ve školství.

Klíčová slova: srovnání, záření, kontaminace, likvidace, polovodič

Abstract

This thesis compares the HBO series Chernobyl with reality. But first, all the technical terms, units and quantities needed for the subsequent comparison are explained. Then, it focuses on the effects of ionizing radiation on living matter and explains the effects of radiation on the cell and all possible manifestations of damage to the human organism depending on the time and magnitude of the radiation dose. An explanation of the function of semiconductor components and how ionizing radiation affects their function is crucial for successful comparison. The Chernobyl nuclear power plant itself is also an integral part of this. The thesis starts with a description of the location of the plant and all its important parts. The central part of the whole plant is the RBMK-1000 reactor. The whole principle of its operation is described. To put this into context, it is important to understand what actually happened in the control room of the plant on the fateful day of 26 April 1986. A description of all the decisions made by the reactor operators and their consequences leading up to the fatal disaster are described in the next section. The effects of the accident and its impact on the rest of the world are also important. The expertise of this work should correspond to the technical orientation of the author. The aim of the thesis is to compare selected events which are presented in some way in the series but in reality their courses were different. The main task of the author was to find such situations in the series, to present their conflict with reality and to describe their actual course. For this reason, the initial emergency measures after the explosion and especially the way they were executed. Another inconsistency was the magnitude of the possible secondary explosion and the associated threat of melting of the corium and the method of its cooling. The series also diverged from reality in the case of the disposal of graphite debris on the roof of the unit 3 reactor. In a common section entitled the effect of radiation on the human body, these disagreements are explained. The progress of acute radiation sickness one of the firefighters and the fate of people from the railway bridge and the real meaning of plastic tents in the hospital. The result is an assessment of the extent to which the differences between the series and reality are significant enough to affect its overall meaning for society and its possible use in education. The conclusion is that the series has very faithfully portrayed the Chernobyl accident. However, in some cases it does not present complete information or in the exact chronological order of how they actually happened, such as the helicopter crash. But this information can easily be added or explained. Thus, the only serious error is the size of the secondary explosion, which needs to be set straight. These conclusions suggest that the series could also be a very successful teaching tool in education, once the information is completed.

Keywords: comparison, radiation, contamination, elimination, semi – conductor

Obsah

Úvod.....	6
1 Teoretická část	8
1.1 Pojmy, jednotky a veličiny	8
1.2 Radiobiologické účinky ionizujícího záření	10
1.2.1 Stádia účinků ionizujícího záření na živou hmotu.....	10
1.2.2 Účinky záření na buňky	12
1.2.3 Orgánová postižení v závislosti na času, dávce a biologickém účinku ...	13
1.2.4 Deterministické (nestochastické) projevy poškození organismu	15
1.2.5 Pozdní stochastické účinky na organismus.....	17
1.2.6 Postižení zárodku a plodu	19
1.3 Polovodiče.....	20
1.3.1 Vodivost polovodičů	20
1.3.2 Typy vodivostí	21
1.3.3 PN přechod	21
1.3.4 Účinky záření na polovodiče	22
1.4 Lokalizace jaderné elektrárny Černobyl.....	24
1.4.1 Jaderné elektrárny v Sovětském svazu	24
1.4.2 Pripjať.....	25
1.5 Elektrárna Černobyl.....	25
1.5.1 Schéma principu elektrárny	27
1.5.2 Reaktor RBMK 1000	29
1.6 Havárie.....	33
1.6.1 Průběh havárie.....	34
1.6.2 Příčiny havárie.....	37
1.6.3 Následky havárie.....	39
2 Komparace událostí, seriál x realita	41
2.1 Prvotní havarijní opatření	41
2.1.1 Havárie vrtulníku.....	43
2.2 Velikost druhotné parní exploze	44
2.2.1 Sloní noha	46
2.3 Odstranění radioaktivních trosk ze střechy 3. bloku	47
2.3.1 Bioroboti	49
2.4 Vliv ozáření na lidský organismus	49
2.4.1 Radiační popálení jednoho z hasičů.....	49
2.4.2 Smrt přihlížejících lidí na mostě.....	50
2.4.3 Kontaminování dalších lidí stykem s ozářenými pacienty	51
Diskuze.....	53
Závěr	56
Referenční seznam literatury.....	57

Úvod

Historie jaderné energetiky se začala psát po druhé světové válce, kdy úsilí o výrobu atomové bomby vystřídala touha o ovládnutí štěpné reakce pro výrobu elektřiny. K tomu dochází v roce 1951, kdy se podařilo za pomoci experimentálního amerického reaktoru EBR – 1 rozsvítit 4 žárovky. V roce 1954 byla v Obninsku v Sovětském svazu zprovozněna první elektrárna, která však sloužila pouze k vojenským účelům. V roce 1956 byla spuštěna britská elektrárna v Calder Hall. V tomto případě se jednalo také o vojenskou elektrárnu, která ale fungovala i komerčně. První čistě komerční elektrárnou se stala až v roce 1957 americká Shippingport. [1]

Od té doby si prošla jaderná energetika výraznou přeměnou. K 1. červenci 2023 bylo podle statistik Světové jaderné asociace (World Nuclear Association – WNA) v provozu 436 jaderných reaktorů ve 31 státech světa s celkovým instalovaným výkonem 391 699 MW_e. [2]

Žádný vývoj se ale neobejde bez komplikací. Havárií jaderných elektráren se za dobu jejich relativně krátké existence objevilo několik. Ta nejničivější se odehrála 26. dubna 1986 v ukrajinském Černobyli. Tato havárie zapříčinila změnu pohledu veřejnosti na jadernou energetiku. Zvedla zájem o možné bezpečnostní hrozby, ale podpořila i vývoj nových bezpečnostních opatření. Stávající jaderné elektrárny prošly modernizací a zpřísnila se i pravidla pro stavbu nových reaktorů.

Tato diplomová práce se věnuje právě osudné havárii v Černobylské jaderné elektrárně. Pro plné pochopení všech událostí, které v osudný den výbuchu nastaly je nejprve nutné uvedení do tématu. Práce je tedy strukturována tak, že se nejprve zabývá vysvětlením všech pojmů, jednotek a veličin, které se zde objevují. Do detailu jsou zde rozebrána hlavní rizika, která při jaderném výbuchu vznikají a jakým způsobem mohou ovlivnit život člověka, potažmo celé fauny i flóry. V této práci nelze opomenout ani komplexní popis všech částí jaderné elektrárny Černobyl a jejich funkci. Významná část je pak věnována samotné jaderné katastrofě, jejím příčinám a následkům.

Zadání této práce však jasně definuje její směřování. Hlavním úkolem je porovnání všech skutečností, které tu byly prozatím zmíněny a opírají se o vědecká fakta, nebo výpovědi očitých svědků, s pětidílným seriálem Černobyl společnosti HBO. K tomu, aby mohlo být samotné porovnání vůbec provedeno, bylo zapotřebí nastudování samotného seriálu a vyhledání ověřených autorů, kteří se tímto tématem zabývají. Po tomto nastudování byly objeveny rozpory mezi seriálem a realitou. Neméně důležitým úkolem bylo ucelení těchto rozporů do celků, pro jejich snadnější vysvětlení.

Byla provedena komparace těchto celků. Prvotní havarijní opatření, zejména pak způsob likvidace produkce kouře, záření a radioaktivního popela z vybuchlého reaktoru. K tomu se řadí i nesrovnalosti ohledně havárie vrtulníku. Druhým celkem byla hrozba druhotné exploze a s ní související hrozba protavení koría, díky které došlo k vyhloubení tunelu pod reaktorem a následnému vzniku tzv. sloní nohy. Dalším celkem bylo odstraňování radioaktivních trosk ze střechy reaktoru 3. bloku a s tím související likvidátoři. Poslední celek věnovaný vlivu ozáření na lidský organismus se věno-

val průběhu akutní nemoci z ozáření u jednoho z hasičů, osudu lidí ze železničního mostu a skutečnému významu igelitových stanů v nemocnici.

Vytyčeným cílem práce není pouze vědecké vysvětlení všech nesrovnalostí, které se v seriálu objevily. Cílem je zároveň objektivní posouzení, zda jsou tyto nesrovnalosti na tolik zásadní, že seriál má pouze hodnotu filmového zážitku, nebo zda i přes tyto nesrovnalosti může sloužit jako hodnotná učební pomůcka.

1 Teoretická část

1.1 Pojmy, jednotky a veličiny

Radioaktivita: je proces, při kterém dochází k samovolné přeměně atomových jader za uvolňování ionizujícího záření. [3]

Ionizující záření: jedná se o záření s tak vysokou energií, že je schopno vyrazit elektrony z atomového obalu, čímž látku ionizuje. Tento typ záření provází radioaktivní přeměnu látek. [3]

Záření alfa: se sestává z jader helia, konkrétně ze dvou protonů a dvou neutronů, a nese dva kladné náboje. Má vysokou ionizační schopnost, tedy schopnost vytvářet mnoho párů elektron-iont podél své trajektorie. Dosah alfa částic je velmi krátký: několik centimetrů ve vzduchu a desítky mikrometrů v tkáni. [3]

Záření beta: jsou částice, konkrétně elektrony nebo pozitrony, emitované při beta přeměně radioaktivních jader prvků. Tyto částice nesou kladný nebo záporný elektrický náboj a jejich pohyb může být ovlivňován elektrickým polem. Mají větší pronikavost než alfa částice, dosahují ve vzduchu asi jednoho metru. [3]

Záření gama: je tvořeno proudem fotonů (elektromagnetické záření) a má mnohem vyšší pronikavost než záření alfa a beta. Ve vzduchu může dosahovat několik metrů, v tkáni centimetrů. K jeho odstínění je nutný materiál s vysokou hustotou, například kov nebo beton. [3]

Aktivita (A): jedná se o počet radioaktivních přeměn radionuklidu za jednotku času. Koncentrace radionuklidu v látce se může vyjadřovat jako hmotnostní, objemová nebo plošná aktivita. [4]

Becquerel (Bq): jednotka aktivity v soustavě SI. Jeden becquerel se rovná jedné přeměně za sekundu. Starší jednotka je curie (Ci), kde 1Ci odpovídá $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq. Hmotnostní aktivita se udává v $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, objemová v $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ a plošná v $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$.

Dávka (D): množství energie předané určité látce ionizujícím zářením na jednotku hmotnosti, což je míra účinku ionizujícího záření. [4]

Gray (Gy): jednotka dávky ionizujícího záření v soustavě SI. Jeden gray je roven jednomu joulu energie předanému jednomu kilogramu látky ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$). [4]

Ekvivalentní dávka (H_T): bere v úvahu různé účinky různých druhů záření na živou tkáň. Je to součin dávky $D_{T,R}$ a radiačního váhového součinitele w_R , který vyjadřuje závažnost působení konkrétního druhu záření (tab. 1). Jednotkou ekvivalentní dávky je sievert (Sv). [5]

Druh záření	Radiační váhový součinitel
Záření beta, gama, RTG	1
Neutrony	5 – 20 (dle energie)
Protony	5

Záření alfa	20
-------------	----

Tabulka 1: Hodnoty radiačních váhových součinitelů dle doporučení ICRP. [5]

Efektivní dávka (E): efektivní dávka bere v úvahu riziko stochastických účinků při nerovnoměrném ozáření, přičemž zohledňuje různé citlivosti jednotlivých orgánů a tkání na ozáření. Efektivní dávka se vypočítává jako součet součinů tkáňových váhových koeficientů w_T (tab. 2) a ekvivalentních dávek H_T v ozářených orgánech nebo tkáních. [5]

Tkáň nebo orgán	Tkáňový váhový součinitel
Kostní dřev, střevo, plíce, žaludek, prs	0,12
Gonády	0,08
Močový měchýř, jícn, játra, štítná žláza	0,04
Povrch kosti, mozek, slinné žlázy, kůže	0,01
Ostatní orgány celkem	0,12
Celkem	1

Tabulka 2: Hodnoty tkáňových váhových součinitelů dle doporučení ICRP. [5]

Sievert (Sv): je jednotka pro měření ekvivalentní dávky, efektivní dávky a dalších dávkových veličin souvisejících s absorbovanou energií ionizujícího záření v hmotnostní jednotce. V systému SI je její ekvivalentní jednotkou joule na kilogram ($J.kg^{-1}$). [5]

Úvazek efektivní dávky $E(\tau)$, nebo úvazek ekvivalentní dávky $H_T(\tau)$: představuje časový integrál efektivní dávky nebo ekvivalentní dávky po dobu τ od expozice radionuklidu. Pro dospělé se obvykle předpokládá doba τ 50 let a pro děti 70 let. Tyto úvazky se používají k hodnocení vnitřní kontaminace v závislosti na typu ozáření a metodách monitorování. [5]

Poločas rozpadu ($T_{1/2}$): je doba, za kterou se rozpadne polovina počátečního množství radioaktivních jader na jiný nuklid. [5]

Nuklid: nuklidy jsou atomy stejného chemického prvku s identickým počtem protonů a neutronů v jádře. [5]

Radionuklid: radionuklidy jsou nestabilní izotopy chemického prvku, které se samovolně přeměňují na jiné nuklidy, a přitom emitují ionizující záření. [5]

Izotop: izotopy jsou atomy stejného prvku s odlišným počtem neutronů v jádře, což vede k různým hmotnostem, ale stejnému chemickému chování. [5]

Limity ozáření: jsou stanovené kvantitativní hodnoty, které omezuje celkové ozáření z radiačních činností, jejich překročení není v určených situacích přípustné. Souhrn všech platných limit je uveden v tabulce 3. [5]

Limitovaná veličina	Obecný limit	Limit pro radiační pracovníky	Limity pro učně a studenty
Součet efektivních dávek ze			

zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření	1 mSv/rok	100 mSv/ 5 roků 50 mSv/rok	6 mSv/rok
Ekvivalentní dávka v oční čočce	15 mSv/rok	150 mSv/rok	50 mSv/rok
Průměr. Ekvivalentní dávka v 1 cm ²	50 mSv/rok	500 mSv/rok	150 mSv/rok
Ekvivalentní dávka v prstech až předloktí a v chodidlech až po kotníky	-	500 mSv/rok	150 mSv/rok

Tabulka 3: Limity ozáření. [5]

Stupeň Celsia (°C): jednotka teploty, hodnota 0 °C přibližně odpovídá teplotě tání ledu a 100 °C teplotě varu vody při normálním tlaku. [4]

Kelvin (K): Kelvin je jednotkou termodynamické teploty a také vhodnou jednotkou pro měření teplotního rozdílu, přičemž je stejně velká jako stupeň Celsia. Patří mezi sedm základních jednotek soustavy SI. Přestože teplotní rozdíl měřený ve stupních Celsia i kelvinech je identický, jejich stupnice mají odlišné počátky: 0 °C odpovídá 273,15 K, zatímco 0 K představuje absolutní nulu. [4]

Joule (J): je jednotka práce a energie, v soustavě SI patří mezi odvozené jednotky.

Watt (W): je hlavní jednotka výkonu v soustavě SI. [4]

Kapalný dusík: je dusík, který byl ochlazen na velmi nízkou teplotu, aby se převedl do kapalného stavu. Má bod varu přibližně -196 °C. Vyrábí se pomocí frakční destilace zkapalněného vzduchu. Tato bezbarvá kapalina má viskozitu zhruba desetkrát nižší než aceton při pokojové teplotě, což je přibližně třicetkrát nižší než viskozita vody. Kapalný dusík se používá jako chladivo. [4]

1.2 Radiobiologické účinky ionizujícího záření

1.2.1 Stádia účinků ionizujícího záření na živou hmotu

1.2.1.1 Fyzikální stádium

Když kvantum ionizujícího záření interaguje s hmotou, energie záření je předávána hlavně orbitálním elektronům v atomech, což vede k ionizaci a excitaci. Uvolněné elektrony s dostatečně vysokou energií mohou způsobit další excitace a ionizace dalších atomů, čímž vzniká celá kaskáda. Při absorbované dávce 1 Gy v tkáni dojde k přibližně 10⁵ ionizacím v každé ozářené buňce (o typické velikosti asi 10 μm). Tento primární proces je extrémně rychlý (prakticky okamžitý, rychlost kvant je rovna nebo blízká rychlosti světla) a trvá přibližně 10⁻¹⁶ až 10⁻¹⁴ sekundy. [6]

1.2.1.2 Fyzikálně-chemické stádium

Ionizace a excitace způsobují rozpad chemických vazeb mezi atomy a molekulami. Dochází k následným fyzikálně-chemickým procesům, kdy ionty interagují s molekulami, což vede k disociaci molekul a tvorbě volných radikálů. Tento proces je také velmi rychlý a trvá pouze mezi 10^{-14} a 10^{-10} sekundy. [6]

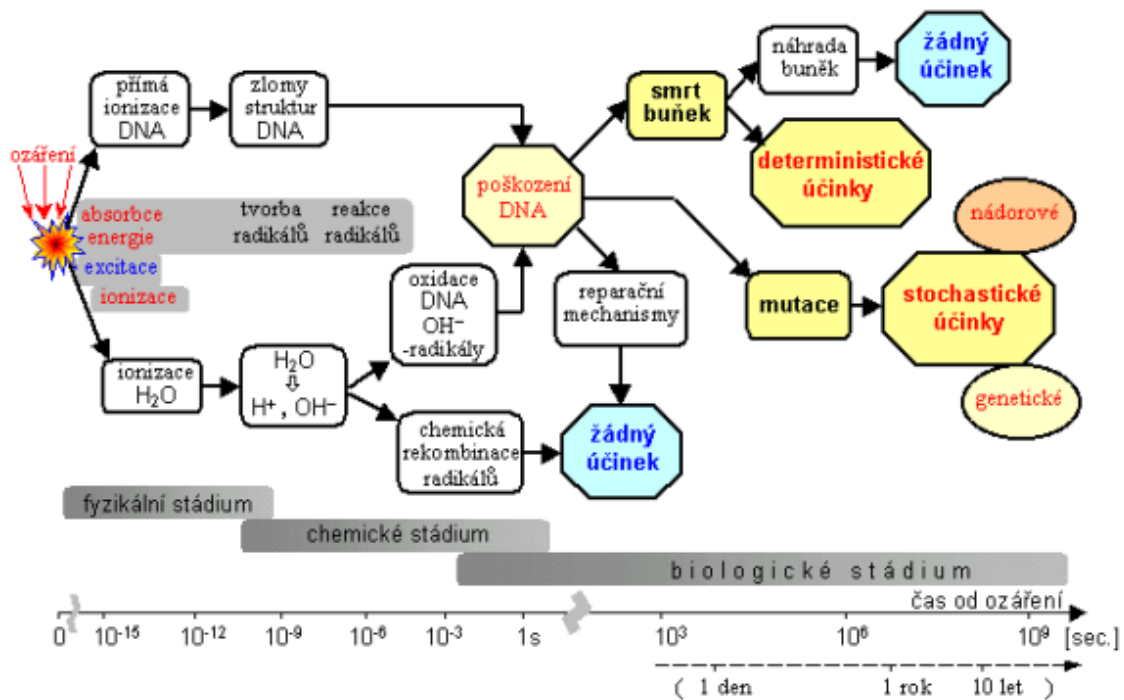
1.2.1.3 Chemické stádium

Vzniklé ionty, radikály, excitované atomy a další produkty reagují s biologicky důležitými organickými molekulami (např. molekulami DNA, RNA, enzymy a proteiny), čímž mění jejich složení a funkci. Na molekulární úrovni se často objevují poruchy jako zlomy řetězců v molekule DNA, což může být buď zlom jednoho vlákna cukrofosfátového řetězce, nebo kompletní zlom dvojitáku DNA. Mohou také vznikat poškození purinových a pyrimidinových bází, atypické vazbové můstky (cross-linky) uvnitř dvojitáku DNA, lokální denaturace a další chemické změny. Genotoxické procesy v této chemické fázi trvají různě dlouhou dobu – od tisíců sekund až po několik sekund, v závislosti na tom, jak dlouho trvá transport reaktivních složek z místa svého vzniku do místa, kde napadají biomolekuly. [6]

1.2.1.4 Biologické stádium

Molekulární změny v klíčových biologických látkách, jako jsou DNA, enzymy a proteiny, mohou způsobit funkční a strukturální změny v buňkách, orgánech i v celém organismu. Délka této fáze se může lišit od několika sekund na buněčné úrovni až po roky na úrovni celého organismu. Tato rozmanitost a delší časový průběh biologických změn souvisí se složitostí biochemických a metabolických procesů v živých organismech a s účinky mnoha zpětnovazebných mechanismů. Na úrovni celého organismu se biologické reakce na vysoké dávky záření mohou projevit somaticky již po několika desítkách minut, u středních dávek během několika dnů jako akutní poškození nebo nemoc z ozáření v důsledku zničení velkého počtu buněk. Při nízkých dávkách může být doba latence několik let nebo dokonce desítky let (pozdní stochastické účinky). [6]

Všechna tyto stadia účinků ionizujícího záření na živou hmotu jsou vyznačena na obrázku 1.



Obrázek 1: Schéma význačných procesů a jejich časové posloupnosti účinků ionizujícího záření na živou tkáň. [7]

1.2.2 Účinky záření na buňky

Základní stavební jednotky všech živých tkání tvoří buňky. Pro pochopení biologických účinků ionizujícího záření jsou proto klíčové mechanismy jeho působení na buněčné úrovni. Při vystavení buňky určité dávce záření mohou v podstatě nastat dva hlavní typy poškození. [8]

1.2.2.1 Smrt buňky (buněčná deplece)

V interfázi: buňka je zničena během klidového období, což je časový interval mezi dvěma buněčnými děleními (mitózami). Tento proces však vyžaduje rozsáhlou denaturaci buněčných složek, což znamená aplikaci relativně vysoké dávky záření.

Mitotická smrt buňky: významnější formou buněčné smrti je zánik spojený s mitózou, tedy s buněčným dělením. Poškozená buňka se nemusí ihned projevit, ale projeví se tím, že není schopna dál pokračovat v dělení. Tento typ buněčné smrti, známý jako mitotická smrt, je pozorován při nižších dávkách, které nestačí na vyvolání smrti v období mezi buněčnými děleními (interfáze). Z toho plyne, že škodlivý účinek záření na buňky se nejvíce projevuje v tkáních, kde probíhá intenzivní buněčné dělení, jako jsou například krevetvorné orgány, střevní výstelka nebo vyvíjející se zárodek. [8]

1.2.2.2 Změna cytogenetické informace

Dalším druhem buněčných poruch jsou změny, které nepřímo neovlivňují průběh buněčného dělení. Tyto změny se vyskytují v genetické informaci buňky, která je uložena

v jádře a obsažena v chromozomech, jež nesou genetické vlastnosti v tzv. genech. Záření může vyvolat mutace, které se podle jedné klasifikace mohou projevit jako bodové, genové nebo chromozomové, v závislosti na jejich povaze. Podle jiné klasifikace se rozlišují mutace gametické, které se týkají reprodukčních buněk a mohou se dědit do dalších generací, a mutace somatické, které ovlivňují ostatní orgány a tkáně a projevují se následky přímo u jedince, ve tkáních vystavených záření. Tyto mutace jsou spojeny s rizikem vzniku rakoviny. [8]

1.2.3 Orgánová postižení v závislosti na času, dávce a biologickém účinku

Ozáření člověka může vyvolat různé chorobné změny, které se projevují buď v krátkodobém horizontu (dny až týdny) nebo dlouhodobě (roky až desetiletí). V minulosti se tyto změny rozdělovaly na časná a pozdní následky ozáření. V současnosti se však používá jiné třídění, které se zaměřuje na základní typy vztahu mezi dávkou ozáření a jeho účinky. Hlavním cílem biologických a lékařských studií je porozumění tomuto vztahu a jeho kvantitativnímu popisu. To umožňuje stanovit cíle a kritéria radiologické ochrany pro plánované aktivity a posoudit možné následky a úkoly zdravotnické pomoci v případě mimořádných situací spojených s ozáření lidí. Účinky ionizujícího záření na celý organismus savců se dělí na deterministické, kde se efekt projeví zákonitě po dosažení určité dávky, a stochastické, kde se s rostoucí dávkou zvyšuje pravděpodobnost poškození. [9]

1.2.3.1 Časná orgánová poškození

Vznikají bezprostředně po ozáření a během jednoho roku po ozáření. Jsou postiženy především buňky produkující krev v kostní dřeni, lymfatické orgány, pohlavní buňky varlat a střevní epitel. Tento stav má za následek dočasný nebo trvalý útlum nebo zánik jejich funkce. Mezi časná následná poškození patří akutní nemoc z ozáření, radiační dermatitida a psychologické účinky. [9]

1.2.3.2 Pozdní orgánová poškození

Vznikají mezi jedním až deseti lety po ozáření jako neúplné reparační procesy. Poškození plic, ledvin, gonád, endokrinních a smyslových orgánů po ozáření se považují za pozdní změny. Dalším příkladem je fibróza postihující vnitřní orgány, zejména plíce a gastrointestinální trakt. [9]

1.2.3.3 Deterministické účinky

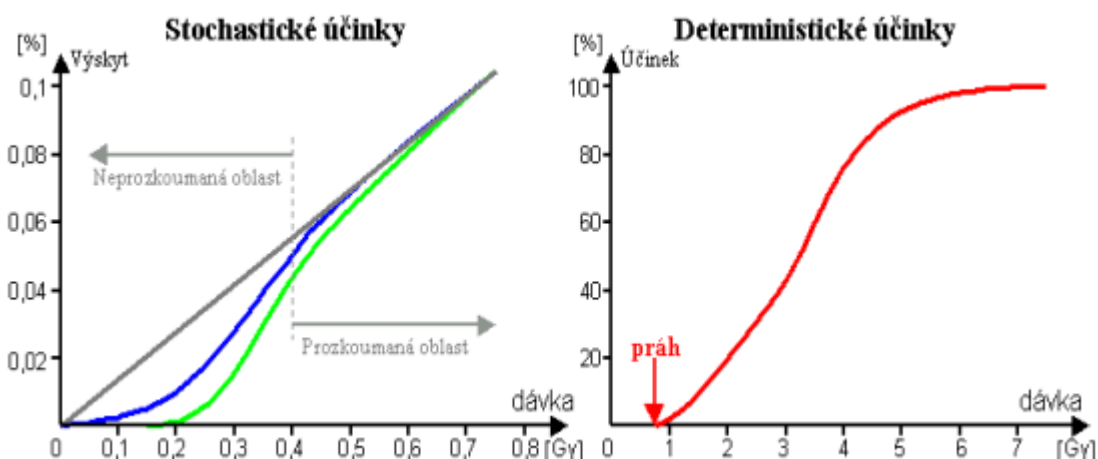
Účinky, které nastávají po smrti části buněčné populace vlivem ozáření, jsou vážné a jejich závažnost roste s dávkou od určitého prahu, pod kterým se neobjevují. Tyto účinky jsou spojeny s charakteristickými klinickými symptomy, jako je akutní nemoc z ozáření nebo radiační zánět kůže. Tyto efekty jsou také označovány jako účinky nestochastické, protože vykazují typickou existenci dávkového prahu. [9]

1.2.3.4 Stochastické účinky

Účinky způsobené mutacemi (změnami v genetické informaci buňky) jsou pravděpodobné a jejich vztah k dávce záření je statistický. Tyto účinky jsou označovány jako stochastické, což znamená, že jejich pravděpodobnost je náhodná. Velikost dávky záření neovlivňuje závažnost projevu u jednotlivce, ale může změnit frekvenci výskytu zhoubných novotvarů a dědičných poškození v populaci. S rostoucí dávkou záření roste i pravděpodobnost poškození u jednotlivce. Klinický obraz těchto účinků není specifický a nelze jej odlišit od případů, které se vyskytují spontánně. [10]

Pokud se dávka udrží pod prahovou hodnotou pro deterministické účinky, jejich vzniku lze zabránit. Naopak, stochastické účinky nelze zcela vyloučit, ale je možné snížit pravděpodobnost jejich vzniku na úroveň považovanou za přijatelnou pro jednotlivce i společnost. [10]

Na obrázku číslo 2 jsou zobrazeny stochastické a deterministické účinky v závislosti na dávce. Stochastické účinky jsou znázorněny více předpokládanými průběhy (modrá a zelená křivka), přičemž při malých dávkách existuje málo prozkoumaná oblast účinků. Na grafu deterministických účinků je na červené křivce zvýrazněn práh, od kterého dochází s určitostí k následným orgánovým poškozením.



Obrázek 2: Stochastické účinky (vlevo) a deterministické účinky (vpravo). [9]

Jelikož se jednotlivé zdravotní následky v závislosti na dávce, času a biologických účincích prolínají, je v tabulce 4 vytvořen celkový přehled zdravotních následků ozáření.

Účinky záření	Deterministické (Nestochastické)		Stochastické	
	Časné	Pozdní		
	Somatická		Genetická	
	Akutní nemoc	Nenádorová	Zhoubné	Genetické účinky

	z ozáření	pozdní poškození	nádory (rakovina)	u potomstva
Zdravotní Následky ozáření	Akutní lokální změny	Chronická dermatitida		
	Radiační dermatitida	Zákal oční čočky		
	Poškození fertility			
	Poškození vývoje plodu			

Tabulka 4: Celkový přehled zdravotních následků ozáření. [11]

1.2.4 Deterministické (nestochastické) projevy poškození organismu

Deterministické účinky nastávají v důsledku ztrát buněk v klíčových buněčných populacích. Tyto účinky se nevyhnutelně objeví, když je překročen určitý prahový limit dávky. Intenzita těchto účinků je přímo úměrná dávce, s vyšší dávkou se zvyšuje i intenzita projevu. [12]

Mezi nejznámějšími projevy deterministických poškození se nachází akutní nemoc z ozáření, akutní poškození kůže, sterilita a zákal oční čočky. Akutní nemoc z ozáření, akutní poškození kůže a sterilita jsou rané následky, zatímco zákal oční čočky je pozdní následek. [12]

1.2.4.1 Akutní nemoc z ozáření

Akutní nemoc z ozáření, také známá jako akutní radiační syndrom, vzniká po jednorázovém ozáření celého těla vysokou dávkou radiace. Tento stav byl nejčastěji zaznamenán u obětí jaderného útoku na Japonsko v roce 1945, a v běžné praxi se vyskytuje jen zřídka. Klinické projevy akutní nemoci z ozáření závisí na velikosti přijaté dávky. V závislosti na dávce se příznaky projevují nejprve poruchou krvetvorných orgánů, následně trávicího ústrojí, a nakonec centrálního nervového systému. [12]

Hematologická (dřeňová) forma: u pacientů, kteří byli vystaveni dávce od 0,7 Gy, dochází k závislému útlumu tvorby krve. Tento útlum může vést k pancytopenii, což znamená současný pokles počtu všech typů krevních buněk (červených i bílých krvinek a krevních destiček) v důsledku malé až nulové reprodukce těchto buněk. Změny v krevním obrazu se objevují nejdříve 24 hodin po ozáření. Přesný čas útlumu jednotlivých typů cirkulujících buněk se však liší. [12]

Hematopoetická kostní dřeň je tkání nejvíce postiženou při celotělové expozici ionizujícím záření v rozmezí 1 až 10 Gy. Rozsah poškození kmenových buněk závisí na dávce záření. Při dávce 1 Gy přežije 37 % kmenových buněk, zatímco při dávce 5

Gy je to jen 1 %. Kmenové buňky jsou citlivější na záření, čím méně jsou diferencované. [12]

Střevní forma: při dávkách ionizujícího záření v rozmezí 6 až 10 Gy se projevují vážné symptomy, včetně intenzivních průjmů s výraznou ztrátou tekutin a nerovnováhou minerálů, doprovázených krvácením ze střev a hrozbou chirurgických komplikací. Způsobuje to poškození střevního epitelu, kde dochází k patologické nekróze buněk výstelky střeva, což vede k obnažení povrchu střeva. Pokud pacient přežije 7 až 10 dní, začnou se projevovat i symptomy poškození krevtovorných orgánů. Při dávkách nad 20 Gy jsou symptomy v raném období tak výrazné, že může nastat metabolický rozvrat, srdeční selhání a postižený může upadnout do kómatu. [12]

Neurovaskulární forma: tato forma má dvě varianty, cévní a mozkovou. Při dávkách vyšších než 80 Gy vždy dochází ke smrti. Při dávce do 100 Gy smrt nastává během několika dnů, při dávce 500 Gy během dvou hodin a při dávce vyšší než 1000 Gy dochází k okamžité smrti. Poškození tkáně je neopravitelné. Je způsobeno buď přímým působením ionizujícího záření na nervovou buňku, nebo hypoxií v důsledku poškození mozkových cév v choroidálních plexech a mozkových plenách, což vede k akutnímu zánětu, otoku mozku a jeho poškození. Nitrolebeční tlak se zvyšuje. Klinicky se projevuje křečemi, třesem, psychickými změnami a těžkým poruchám vědomí. [12]

1.2.4.2 Akutní poškození kůže

Akutní poškození kůže způsobené ozářením zevním zdrojem či výjimečně zářením beta při povrchové kontaminaci se vyskytuje v různých formách podle dávky ozáření. Nejjednodušší formou je zarudnutí, při vyšších dávkách může dojít k rozvoji zarudnutí přecházejícího v zánětlivý stav a vzniku puchýřů. Nejtěžší formou je vznik nekrotické tkáně a vředů. Prahová dávka pro vznik nejléčší formy poškození kůže je přibližně 3 Gy, zarudnutí se obvykle projevuje 1 až 3 týdny po ozáření. [12]

Erytemotózní dermatitis: nejléčší forma akutního poškození kůže je charakterizována zarudnutím, známým jako radiační dermatitida prvního stupně. Bezpríznakové období trvá v závislosti na velikosti dávky 2 až 4 týdny. Poté se objeví zarudnutí spojené se zánětlivým mokváním ve vazivové vrstvě pod pokožkou. Kvůli vyšší citlivosti buněk vlasových folikulů a mazových žláz na ozáření se buněčné dělení v těchto oblastech zastavuje už při dávkách odpovídajících této formě dermatitidy, což vede k vypadávání vlasů a ochlupení, tedy k epilaci. Přechodná epilace nastává po dávce 3 Gy a projevuje se kolem třetího týdne. Po dávce 6 Gy může být epilace trvalá. [12]

Deskvamativní dermatitis: je druhým stupněm, vzniká po ozáření vyššími dávkami, přibližně 12 – 20 Gy. Tento stupeň se často projevuje nevýrazným časným erytémem, který se objevuje během několika hodin po ozáření, nejpozději do dvou dnů, a poté mizí. Při vyšších dávkách se erytém může objevit opakovaně. Latentní doba před rozvojem plných příznaků bývá 2 – 3 týdny. V této fázi se zánětlivý exsudát (zánětlivý extravaskulární výpotek) hromadí v poškozené vrstvě bazálních buněk, což vede k tvorbě puchýřů a mokvajících ploch. V příznivějších případech dochází po dalších 2 – 3 týd-

nech k obnově pokožky z okrajů poškození a z přežívajících kmenových buněk ve vlasových folikulech. [12]

Nekrotická forma dermatitidy: vzniká v důsledku poškození hlubších vrstev kůže nebo podkoží (radiční dermatitida třetího stupně). Obvykle je to způsobeno změnami v cévách a komplikujícími infekcemi, které vedou k odumření tkáně, jejímu odloučení a vzniku vředu. Nová pokožka, která se vytvoří, je často velmi tenká a křehká, nemá dostatečně silnou výživovou vrstvu a špatně odolává mechanickým, chemickým či mikrobiálním vlivům. Proto se často po 1–2 letech, nebo i později, objevuje sekundární vřed, který obvykle vyžaduje zásah plastického chirurga. Klinický obraz je výrazně ovlivněn větším rozsahem lézí, což bylo například patrné u pacientů ozářených po černobylské katastrofě. [12]

1.2.4.3 Postižení fertility (sterilita)

Další závažné poškození může zahrnovat snížení plodnosti po ozáření pohlavních žláz. Reakce na ozáření pohlavních orgánů se liší u mužů a žen. U mužů dochází již při dávce 0,25 Gy k dočasnému snížení počtu spermií, sterilita nastává při dávkách 3 – 8 Gy, avšak plodnost se často může obnovit. U žen se trvalá sterilita objevuje po dávce kolem 3 Gy, přičemž záleží na věku ženy. Rozdíl je v tom, že vajíčka, která se ztrácí během měsíčních cyklů, nejsou nahrazována, zatímco u mužů se zásoba spermií průběžně doplňuje. U žen mohou být ovlivněny i sekundární pohlavní znaky, protože ženské pohlavní hormony jsou produkovány rychle se dělícími buňkami kolem dozrávajícího vajíčka. U mužů jsou buňky odpovědné za tyto procesy relativně odolné a nejsou součástí zárodečné tkáně. [12]

1.2.4.4 Zákal oční čočky (katarakta)

Poškození oční čočky se může projevit ve formě zadní katarakty. Tento stav je charakterizován nízkou prahovou dávkou radiace, přibližně 0,2 Gy. Zadní katarakta se obvykle rozvíjí po více než šesti měsících od expozice radiaci. Katarakta se projevuje zvětšujícími se granulacemi na zadní stěně čočky. Tyto granulace mají změněnou architekturu vláken čočky, což omezuje průnik světelných paprsků k sítnici. Jelikož čočka nemá vlastní přímou výživu ani buněčný substrát, může být doba od ozáření do vzniku viditelných změn relativně dlouhá, obvykle 6 měsíců a více. [12]

1.2.5 Pozdní stochastické účinky na organismus

Stochastické účinky představují změny vyvolané mutacemi buněk, buď somatickými (v tkáních mimo pohlavní buňky) nebo gametickými (v zárodečných buňkách). Tyto mutace mohou v populaci spontánně vznikat, avšak vliv ionizujícího záření byl prokázán jako zvyšující jejich výskyt. Klinické příznaky nádorů vzniklých spontánně nelze odlišit od těch, které jsou důsledkem ozáření. Tyto účinky jsou bezprahové, ale s rostoucí dávkou záření se zvyšuje pravděpodobnost poškození. Samotná závažnost poškození však není přímo závislá na dávce záření. Mezi stochastické účinky patří vznik maligních nádorů a genetických změn. [13]

1.2.5.1 Nádorová onemocnění

Zhoubné nádory jsou nejzávažnější dlouhodobými fyzickými následky ionizujícího záření. Klíčovým rysem vzniku rakoviny je její složitý charakter. První složkou je existence buněk, které nesou mutovanou genetickou informaci a předávají ji svým potomkům. Druhou složkou je soubor faktorů, které brání v eliminaci atypických buněk nebo podporují jejich nekontrolovaný růst. Mezi tyto faktory patří viry a karcinogenní látky obsažené například v dehtech. V další fázi vývoje nádoru hraje roli například změna v hormonální rovnováze nebo oslabení imunitního systému. Ionizující záření může ovlivňovat různé fáze rakovinného procesu. Existuje mnoho pozorování naznačujících, že i malé dávky ionizujícího záření mohou zvyšovat riziko rakoviny. Studie na přeživších z atomových útoků v Hirošimě a Nagasaki, pacientech léčených rentgenovým zářením v Anglii a analýza úmrtí radiologů v USA v letech 1900–1950 podporují tuto teorii. [13]

Různé tkáně a orgány mají různou citlivost na vznik nádorů po ozáření. Mezi nejcitlivější patří kostní dřev, žaludek, tlusté střevo a plíce, a nově i mléčná žláza u žen. Číslo, které vyjadřuje celoživotní riziko úmrtí na rakovinu způsobenou zářením (zahrnující variabilní radiosenzitivitu a léčitelnost různých typů nádorů), se nazývá koeficient rizika. Celkový koeficient rizika úmrtí na zářením způsobené zhoubné nádory byl stanoven pro pracovníky na hodnotě $4,1 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ (což znamená, že z 100 pracovníků ozářených efektivní dávkou 1 Sv zemře pravděpodobně 4 osob na nádor). Koeficient rizika úmrtí pro celkovou populaci je vyšší ($5,5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$), kvůli zahrnutí radiosenzitivních dětí. Je třeba zdůraznit, že celkové riziko úmrtí na rakovinu ve společnosti je kolem 25%, což znamená, že téměř každý čtvrtý člověk bez ozáření zemře na nádor. Dále je třeba poznamenat, že tyto odhady platí pro celoživotní expozici k nízkým dávkám ionizujícího záření, přičemž u dětí jsou koeficienty pravděpodobně 2 až 3krát vyšší, u dospělých nad 50 let pak 5 až 10krát nižší (s výjimkou některých typů leukémií). [13]

Důležitým rysem je časové zpoždění mezi ozářením a výskytem zhoubných nádorů. Nádory se neobjevují ihned po ozáření, ale až po několikaleté latenci, například u leukémie to může být 5 až 20 let, u nádorů plic 10 až 40 let. [13]

Děti a mládež jsou v porovnání s dospělými citlivější na ozáření až 3 až 10krát. Tento jev je způsoben tím, že u nich probíhá intenzivnější dělení buněk a zároveň mají delší dobu života před sebou, což znamená, že mají více času na projev možných účinků ozáření. Na rozdíl od dospělých, u kterých je pravděpodobné, že mají méně času života před sebou než 5leté dítě. [13]

1.2.5.2 Genetické změny

Důležitou skupinou dlouhodobých účinků záření je poškození potomstva ozářených jedinců. Genetické změny jsou základem těchto účinků a vznikají mutacemi, což jsou změny v genetické informaci buňky. Dědičné účinky záření jsou způsobeny gametickými mutacemi, které se vyskytují v jádrech zárodečných buněk (vajíčka, spermie) pohlavních žláz. Záření zvyšuje frekvenci mutací ve srovnání s těmi spontánně vzniklými. Mutované geny se mohou přenášet na další generace, protože mutované buňky se mohou dělit a předávat tak mutaci dál. Výsledkem může být poškození embrya, které se

projeví například neúspěšným oplozením nebo přerušáním těhotenství prostřednictvím potratu, předčasného porodu nebo úmrtí novorozence s vážnými vrozenými vadami. Genetické faktory mohou přispět až k 25 % případů samovolného potratu. Mezi další následky patří geneticky podmíněné vývojové vady, jako je Downův syndrom, a změna poměru pohlaví v populaci. Záření může také ovlivnit složité biologické charakteristiky, jako je fyzická síla, inteligence nebo motorické schopnosti. Z uvedeného je zřejmé, že mutace mohou významně ovlivnit šance nových jedinců na přežití a jejich další uplatnění. Odhaduje se, že mutovaný gen může přetrvávat v populaci až 40 generací. [13]

Kvantitativní odhady vztahů mezi dávkou ionizujícího záření a genetickými účinky se většinou opírají o experimentální data. Nově odhadnutý koeficient rizika genetických účinků pro celkovou populaci je $0,2 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$. U kojenců a dětí s očekávanou plnou reprodukční schopností je toto riziko několikanásobně vyšší než u celkové populace. Naopak u starších věkových skupin riziko genetických účinků klesá k nule, což souvisí s poklesem reprodukční schopnosti. Při hodnocení vlivu ionizujícího záření na geneticky podmíněné nepříznivé vlastnosti potomstva je důležité vzít v úvahu, že v normální populaci je spontánní výskyt geneticky podmíněných odchylek přibližně 5 – 10 na 100 živě narozených dětí. [13]

1.2.6 Postižení zárodku a plodu

Pokud jde o škodlivé účinky záření na rozvíjející se plod, existují jak náhodné (stochastické), tak nestochastické efekty, které je dělí do samostatné kategorie. Míra možného poškození zářením na embryonální vývoj závisí na čase ozáření vzhledem k době od početí. V prvních třech týdnech po početí, kdy je počet buněk zárodku malý a buňky ještě nejsou specializované, může způsobit poškození těchto buněk, často vedoucí k neschopnosti implantace nebo k zániku oplozeného vajíčka. [13]

Vliv ozáření na embryo: kritickým obdobím je časové okno během velké organogeneze, které se u člověka typicky vyskytuje mezi 4. a 8. týdnem po oplození vajíčka. Expozice záření v tomto období může způsobit buňkovou ztrátu, což má za následek úhyn zárodku, snížení hmotnosti embrya nebo změny v jednotlivých orgánech, vzhledem k narušení složitých procesů vývoje těla a jeho částí. Tento proces může ovlivnit vývoj centrálního nervového systému a kosterního obalu, což se může projevit zakrnělým vývojem mozku nebo oka, rozštěpy patra a dalšími anomáliemi. Při aplikaci konceptu prahové dávky na rychle rostoucí tkáň plodu, které nejsou v rovnováze, mohou vzniknout problémy. Z tohoto důvodu se často používá termín "kritická dávka", což je nejnižší dávka záření, která může způsobit nepříznivý efekt u určitého procenta zárodků. Tato dávka je odhadována na 50 mGy. [13]

Ozáření v časném fetálním období: významné ohrožení vývoje centrálního nervového systému nastává převážně mezi 8. a 15. týdnem těhotenství, kdy dochází ke klíčovým migracím buněk a formování nervových spojení. Expozice záření během této kritické fáze může vést v dětství k mentální retardaci, což se projevuje celkovým mentálním zpožděním, nedostatečnou schopností péče o sebe a obtížemi s gramotností. Dokonce i nízká dávka záření 1 Sv může snížit IQ z 100 na 70. Klesání IQ není lineární, a

proto se odhaduje, že prahová dávka záření pro tyto účinky je v rozmezí 0,12 až 0,2 Sv. Mezi 16. a 25. týdnem těhotenství je riziko těchto negativních účinků asi poloviční ve srovnání s předchozím obdobím. [13]

Ozáření v pozdním fetálním období: hlavním nebezpečím je zvýšená citlivost k indukci leukémií a dalších malignit, které se projevují v dětství. Tato citlivost se vztahuje i na raná stadia embryonálního a plodového vývoje, avšak její význam je překryt dalšími riziky. Existuje reálné riziko indukce dětských nádorů ozařováním in utero, i při nízkých dávkách, jak ukazují studie provedené u dětí, jejichž matky podstoupily rentgenové vyšetření z porodnických důvodů v pozdější fázi těhotenství. [13]

1.3 Polovodiče

Polovodiče jsou pevné látky, jejichž elektrická vodivost závisí na vnějších i vnitřních podmínkách. Vnější podmínky, jako je energie (tepelná, elektrická nebo světelná), mohou ovlivňovat elektrickou vodivost polovodičů. Vnitřní podmínky zahrnují příměsi jiných prvků do polovodičů, což také ovlivňuje jejich elektrickou vodivost. [14]

Mimo základní polovodiče jako je křemík a germanium, je možné vytvářet složené polovodiče spojením prvků ze sloupce IV periodické tabulky (například SiC a SiGe) nebo kombinací prvků ze sloupců III a V (jako jsou GaAs, GaN, InP, AlGaAs, AlSb, GaP, AlP a AlAs). [14]

Pro lepší porozumění principu vedení elektrického proudu v polovodičích je důležité se zaměřit na energetické pásy. Existují celkem čtyři základní energetické úrovně. [14]

Vnitřní: v této úrovni jsou elektrony pevně spojeny s jádry. Z hlediska praktického přenosu náboje nemají význam a často bývají ve zjednodušených modelech vynechávány. [15]

Valenční: v této úrovni se nacházejí elektrony, které se účastní tvorby chemické vazby. [15]

Vodivostní: v této úrovni se vyskytují elektrony, které jsou uvolněné z chemických vazeb. Pohyb těchto elektronů v meziatomovém prostoru může ovlivnit elektrickou vodivost látky. [15]

Zakázané: tyto pásy oddělují energetické hladiny, které určují elektrickou vodivost látky, přičemž jejich šířka je klíčová. [15]

Rozhodujícím faktorem pro to, zda je látka izolant, vodič nebo polovodič, je šířka zakázaného pásu. Polovodič v pásovém modelu při teplotě 0 K má prázdný vodivostní pás, což znamená, že zde není žádný volný elektron, který by mohl vést elektrický proud. V této fázi se polovodič chová jako izolant. Avšak s růstem teploty se zvyšuje energie elektronů, což jim umožňuje překonat hranici zakázaného pásu a vstoupit do vodivostního pásu, kde jsou schopni vést elektrický proud. [14]

1.3.1 Vodivost polovodičů

Polovodič potřebuje pro vedení elektrického proudu působení vnější energie, která umožní elektronům získat dostatek energie k překonání zakázaného pásma a vstupu do vodivostního pásu. Tento proces se nazývá ionizace. Zanechané místo po elektronu, který přešel do vodivostního pásu, se chová jako kladně nabitý iont, běžně označovaný jako díra. Tato díra pak může fungovat jako nosič elektrického proudu. [14]

Vlastní polovodič: má formu dokonalého krystalu, který je bez nečistot a vad. Počet elektronů a děr v tomto polovodiči je stejný, takže je navenek elektricky neutrální. Při nízkých teplotách se tento polovodič chová jako izolant a elektrický proud může vést až při teplotách okolo 350 K. Z praktického hlediska nemá vlastní polovodič v elektrotechnice žádné využití. [15]

Nevlastní polovodič: vzniká přidáním atomů jiného prvku do krystalové mřížky. Tyto atomy jsou v přírodním materiálu vždy přítomné (elektrony a díry). Aby se dosáhlo co nejlepších elektrických vlastností, přidávají se tyto atomy i uměle. Tento proces, kdy se do přírodního materiálu přidávají atomy jiného prvku, se nazývá dotování nebo legování. [15]

1.3.2 Typy vodivosti

Polovodič typu N: přidáním pětímocného prvku (jako je P, As nebo Sb) k čtyřmocnému prvku (Si nebo Ge) vzniká specifická směs. V tomto spojení vytvoří čtyři elektrony z valenční vrstvy vazby se sousedními atomy, zatímco pátý elektron se stává přebytečným a jeho vazba k atomu je slabá. Když na polovodič typu N působí malá aktivační energie, může se tento elektron uvolnit a přispívat k vedení elektrického proudu. Pětímocné příměsi jsou nazývány donory nebo dárci, protože poskytují elektrony do vodivostního pásu. [15]

Elektrický proud v polovodičích typu N je veden elektrony, které jsou v tomto případě označovány jako hlavní (majoritní) nosiče. Díry jsou v tomto případě považovány za vedlejší (minoritní) nosiče. [15]

Polovodič typu P: trojmocné příměsi (B, In, Ga, Al) se přidávají k čtyřmocným prvkům (Si nebo Ge), kde se jejich tři valenční elektrony zapojují do vazeb se sousedními atomy, zatímco čtvrtá vazba zůstává neúplná. Pokud na tuto strukturu působí malá energie, elektron se může uvolnit a tato neúplná vazba může být obsazena. V místě, kde elektron chybí, vznikne kladně nabitě místo nazývané díra. Tato díra může fungovat jako nosič kladného náboje a přispívat k vedení elektrického proudu v polovodiči typu P. Třímocné příměsi jsou označovány jako akceptory, protože přijímají elektrony z valenčního pásu polovodiče. [15]

Elektrický proud v polovodičích typu P je přenášen pomocí děr, které jsou hlavními nosiči náboje (majoritními nosiči). Naopak elektrony jsou v tomto typu polovodičů považovány za minoritní nosiče (menšinové nosiče). [15]

1.3.3 PN přechod

PN přechod je klíčovou součástí moderních polovodičových komponent. Jeho účelem je spojení polovodiče typu P s polovodičem typu N, přičemž v místě přechodu nedochází k přerušení krystalové mřížky. Tento stav umožňuje elektronům volně přecházet mezi oběma vrstvami, což je zásadní pro funkci polovodičových součástek. [15]

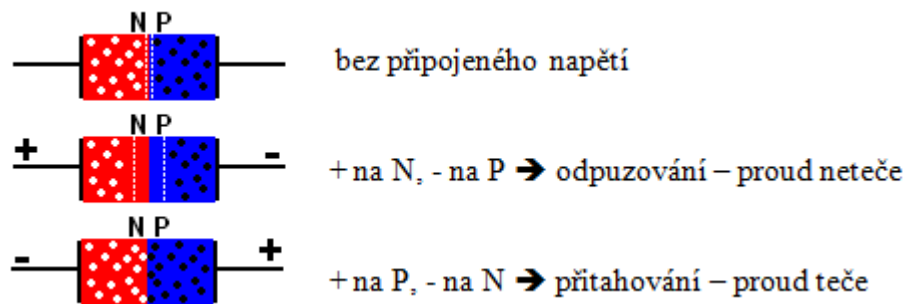
Přechod PN je označení pro spojení dvou oblastí polovodičů, přičemž jedna oblast má vodivost typu P a druhá typu N. [15]

V místě spojení polovodiče typu P a polovodiče typu N vzniká vyprázdněná oblast, která se nazývá hradlová vrstva. V této oblasti nejsou přítomni žádní nosiči náboje, což ji činí elektricky neutrální. Hradlová vrstva se nachází bezprostředně u přechodu PN, za kterým vzniká elektrostatické pole nepohyblivých iontů, které je také nazýváno potenciálovým polem. [15]

Připojením stejnosměrného externího zdroje elektrického napětí kladným pólem k oblasti P a záporným pólem k oblasti N nastane v PN přechodu propustný směr. Malé elektrické napětí externího zdroje stačí k překonání potenciálové bariéry PN přechodu. Majoritní nosiče v polovodiči jsou odpuzovány směrem k PN přechodu, zatímco minoritní nosiče jsou přitahovány k opačnému pólu externího napětí. Tento jev umožňuje průchod mnoha majoritních nosičů přes PN přechod, což způsobuje proud. Toto je nazýváno propustnou polarizací PN přechodu. [15]

Druhou možností je invertovat PN přechod do závěrného směru. Při tomto zapojení externího stejnosměrného zdroje je polarita napájení opačná. Kladný pól externího zdroje se připojí k oblasti typu N a záporný pól k oblasti typu P. Tímto způsobem se vytvoří potenciálový val, který brání majoritním nosičům v PN přechodu přecházet. Avšak minoritní nosiče začnou procházet PN přechodem, avšak jejich množství je obvykle malé v obou oblastech. To vede k tomu, že proud, který tyto nosiče mohou nést, je rovněž malý. V porovnání s průchodem ve směru propusti je elektrický proud procházející PN přechodem v závěrném směru zanedbatelně malý, což vede k tomu, že tento proud se považuje za nulový. [15]

Možnosti připojení napětí a stav bez připojeného napětí na přechod PN můžeme pozorovat na obrázku 3.



Obrázek 3: PN přechod bez a s připojeným napětím. [16]

1.3.4 Účinky záření na polovodiče

Vystavení součástek záření vede k dočasným nebo trvalým změnám jejich vlastností, což ovlivňuje nejen funkci jednotlivých součástek, ale i celého obvodu. Citlivost na záření závisí na typu záření a velikosti dávky. Velikost dávky se měří v jednotkách rad nebo gray ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$) a je vztažena k absorpčnímu materiálu. Efekty, vznikající v ozářeném polovodiči tvořící trvalé změny: [17]

Ionizace: je proces, při kterém se z neutrálního atomu vytvoří iont tím, že se odebere nebo přidá elektron. V kovalentních polovodičích tento proces vytváří volné nosiče náboje, jako jsou elektrony a díry, což vede k přechodným změnám některých fyzikálních vlastností, zejména ke zvýšení vodivosti. V kovových vazbách ionizace zvyšuje kinetickou energii elektronu nebo jej excituje na vyšší energetickou hladinu, avšak elektron se po krátké době vrátí na svou původní energetickou hodnotu. Ionizace způsobená částicemi může být přímá nebo nepřímá. Konečný efekt ionizace závisí nejen na velikosti dávky záření, ale také na napětí, teplotě a délce ozáření. [17]

Tvorba nečistot: pod tímto termínem se rozumí transformace jader, což znamená změnu chemické podstaty a vlastností materiálu. Tento proces se využívá ve výrobě, například při dopování křemíku fosforem, který vzniká při ozáření neutrony. [17]

Pružné srážky mezi částicí a jádrem atomu: srážky mohou být způsobeny jak elektromagnetickými silami (pro nabitě částice), tak jadernými silami (pro neutrony). Při dostatečně vysoké energii částic může dojít k vyražení atomového jádra z krystalové mřížky, přičemž jádro s sebou strhne i elektronový obal. Pouze slabě vázané elektrony ve vnějších slupkách mají šanci se odtrhnout. V krystalové mřížce vznikne vakance a vyražený atom se ocitne mimo svou původní polohu, což se nazývá Frenkelova bodová porucha. Pokud atom při srážce získá energii dostatečnou k vysunutí z mřížkové polohy, může se při vhodném směru srazit s jiným atomem v mřížce, vyrazit ho a zaujmout jeho místo. Tento proces se může opakovat, což vede k jevu známému jako fokusovaná kolize, zahrnující sérii postupných srážek. Každá částice nebo foton schopný předat atomu křemíku energii kolem 21 eV může uvolnit tento atom z krystalové mřížky. Částice mají často mnohem větší energii a obvykle necestují osamocně, což vede ke vzniku shluků defektů, zejména u neutronů. Například neutron s energií 1 MeV může předat atomu křemíku asi 60 keV, což uvolní zhruba tisíc dalších atomů v oblasti přibližně 0,1 μm . Tyto srážky se v materiálu projevují třemi způsoby: [17]

- Vytváření stavů v zakázaném pásu, které zjednodušují přechod elektronů z valenčního do vodivostního pásu, což vede k nárůstu proudu v závěrném směru PN přechodu. V propustném směru tyto stavy podporují rekombinaci. [17]
- Úprava hustoty dopování materiálu. [17]
- Vytváření stavů poblíž hranice dvou pásů, které usnadňují zachycení náboje. [17]

Teplotní klín: vzhledem k tomu, že interakce v polovodičovém materiálu probíhají po krátkých trasách, veškerá ztráta energie se omezuje na malou oblast. Částice, které už nemají dostatek energie na ionizaci dalších částic, přeměňují zbývající energii na teplo. To vede k významnému místnímu ohřevu oblasti a následnému lokálnímu roztavení a zchlazení materiálu. V důsledku toho vznikají poruchy v podobě teplotních klínů.

Tento jev je zásadní zejména při interakcích s rychlými neutrony nebo štěpnými fragmenty, kde dochází k ohřevu jak při primární interakci částic, tak i při kaskádních sekundárních srážkách. [17]

1.4 Lokalizace jaderné elektrárny Černobyl

Jaderná elektrárna Černobyl se nachází v nejsevernější části Ukrajiny, asi 10 km od jižní hranice Běloruska, v oblasti známé jako Polesí. Kyjev, hlavní město Ukrajiny, leží přibližně 120 km od elektrárny a Minsk, hlavní město Běloruska, je vzdálený zhruba 330 km. Elektrárna byla postavena u řeky Pripjat', 15 km severně od města Černobyl, které dalo elektrárně jméno. Detailní mapu této oblasti můžeme pozorovat na obrázku 4. Až do roku 1986 byl Černobyl historickým regionálním centrem s populací kolem 13 000 obyvatel. Nejbližším městem vybudovaným speciálně pro pracovníky elektrárny a jejich rodiny byla Pripjat', vzdálená necelé 2 km. Toto "sídlíšní město" mělo na jaře roku 1986 zhruba 50 000 obyvatel. [18]



Obrázek 4: Mapa oblasti Černobylu. [19]

1.4.1 Jaderné elektrárny v Sovětském svazu

V roce 1951 na příkaz J. V. Stalina začala výstavba jaderné elektrárny v Obninsku, která se o tři roky později stala první jadernou elektrárnou na světě. Reaktor této elektrárny, označený jako AM-1, byl předchůdcem reaktoru typu RBMK, jehož éra teprve měla

přijít. V 60. letech 20. století vedení SSSR rozhodlo o výstavbě několika jaderných elektráren na svém území. Jednou z prvních byla Leningradská jaderná elektrárna, jejíž stavba začala v roce 1970 a byla dokončena v roce 1973, kdy byla uvedena do provozu. Tato elektrárna již využívala reaktor typu RBMK-1000. Následovala výstavba jaderné elektrárny Kursk, jejíž první reaktor byl připojen k síti v roce 1976, a Černobyl, kde byl první reaktor uveden do provozu o rok později. V těchto elektrárnách byly v 70. a 80. letech dostavěny další reaktory typu RBMK-1000. U Černobylu byl druhý reaktor postaven již v roce 1978, třetí reaktor byl uveden do provozu v roce 1981 a čtvrtý reaktor byl dokončen koncem roku 1983. Od roku 1983 se také intenzivně pracovalo na dalších dvou reaktorech, které však nikdy nebyly dokončeny, protože jejich výstavba byla v roce 1988 oficiálně zrušena. [18]

1.4.2 Pripjat'

Město Pripjat' se nachází na břehu řeky Pripjat', v Polesí v Kyjevské oblasti na Ukrajině. Stavba města Pripjat' byla oficiálně zahájena 4. února 1970. Město bylo plánováno jako domov pro zhruba 50 000 lidí, zejména zaměstnanců elektrárny a jejich rodin. Pripjat' obdržela status města v roce 1979. Byla nazývána „městem mladých“, díky pracovníkům jaderné elektrárny, kvůli kterým průměrný věk obyvatel nepřesahoval 30 let. Byli to především technici a jaderní vědci, kteří sem přišli pracovat na nové elektrárně, lákáni vyššími platy a rychlejší možností získat byt a auto, než bylo běžné. Poslední sčítání lidu před evakuací, které proběhlo v listopadu 1985, ukázalo, že město mělo 47 500 obyvatel z více než 25 různých národností. Roční přírůstek obyvatel činil tehdy více než 1500 lidí. [20]

Seriálový vzhled této oblasti je zachycen na obrázku 5.



Obrázek 5: Pripjat'. [21]

1.5 Elektrárna Černobyl

První etapa výstavby černobylské jaderné elektrárny, která zahrnovala dva reaktory typu RBMK-1000, byla realizována v letech 1970 až 1977. Druhá etapa, zahrnující výstavbu dalších dvou reaktorů stejného typu, byla dokončena do konce roku 1983. V roce 1981 začala 1,5 km na jihovýchod od tohoto místa výstavba dalších dvou jednotek se stejnými reaktory, což tvořilo třetí etapu výstavby. V údolí řeky Pripjať, jihovýchodně od elektrárny, byla postavena chladicí nádrž o rozloze 22 km², která sloužila k chlazení kondenzátorů turbín a dalších výměníků prvních čtyř bloků. [22]

V době havárie byla tato elektrárna spolu s leningradskou a kurskou nejsilnější v SSSR. Černobylská elektrárna měla dosahovat výkonu 6000 MW a od dubna 1986 pracovaly čtyři bloky s reaktory RBMK-1000 s celkovou kapacitou 4000 MW. Podle neo-ověřených informací se plánovalo vybudovat až 12 reaktorů. [22]

Rada ministrů SSSR 29. června 1966 schválila plány na zapojení jaderných elektráren do výroby elektřiny v letech 1966-1977. Bylo naplánováno uvedení kapacit s celkovým výkonem 11 900 MW, včetně RBMK - 8000 MW. První blok jaderné elektrárny na Ukrajině měl být spuštěn v roce 1974, druhý v roce 1975. [20]

Černobylský reaktor se skládal ze dvou jednotek se společným systémem speciální úpravy vody a pomocnými zařízeními, jako jsou skladování kapalných a pevných radioaktivních odpadů, dodávky zemního plynu, záložní diesel generátory, hydraulické a další komponenty. Systém skladování kapalných radioaktivních odpadů byl součástí druhé etapy jaderné elektrárny a sloužil k příjmu a dočasnému skladování kapalných radioaktivních odpadů z provozu třetího a čtvrtého bloku a jejich recyklaci. Kapalným odpadem byl transportován potrubím a pevný odpad pomocí elektrických vozíků. Záložní dieselagregát (RDES) sloužil jako nezávislý nouzový zdroj energie pro bezpečnostní systémy každého bloku. Každý blok měl tři dieselové generátory. Pro nepřetržitou dodávku technické vody měly třetí a čtvrtý blok samostatné čerpací stanice napájené ze záložních dieselových agregátů. [22]

Dne 25. dubna 1986 byly všechny čtyři reaktorové jednotky prvního a druhého stupně JE v provozu, podporované normálním provozem dalších systémů a zařízení v areálu elektrárny. [20]

Vyobrazení vzhledu jaderné elektrárny pár okamžiků po osudném výbuchu, jak nám prezentuje seriál HBO, můžeme sledovat na obrázku 6.



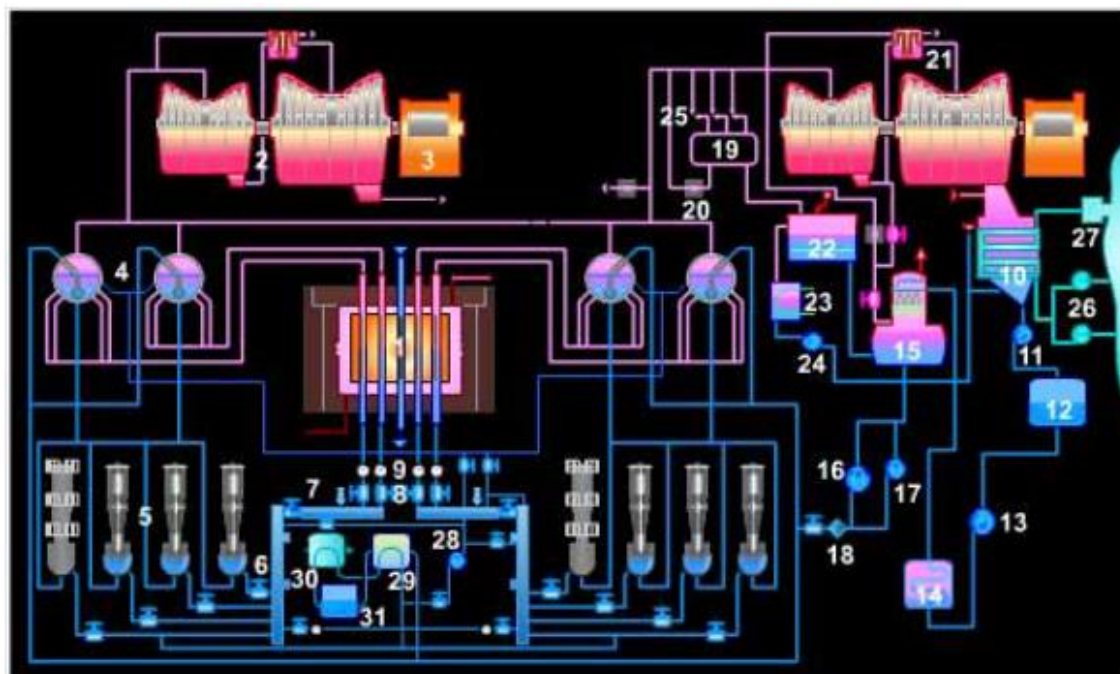
Obrázek 6: Jaderná Elektrárna Černobyl. [21]

1.5.1 Schéma principu elektrárny

Elektrárna má jeden tepelný okruh. Reaktor RBMK je kanálový, varný a používá obyčejnou vodu jako chladivo. Voda v kanálech reaktoru vaří a vzniklá pára pohání dvě turbíny K-500-65/3000. Chladivo cirkuluje reaktorem ve dvou nezávislých okruzích s nucenou cirkulací (KMPC). Každý okruh obsahuje polovinu kanálů reaktoru, což je přibližně 840 kanálů. Každý okruh má čtyři hlavní cirkulační čerpadla (GCN), z nichž tři jsou v provozu a jedno je rezervní. Tato čerpadla dodávají vodu do každého palivového kanálu přes systém kolektorů a potrubí. V kanálech se voda ohřívá na teplotu varu a částečně se vypařuje. Směs páry a vody putuje do separačních bubnů, kde se rozdělí na vodu a páru. Každý blok má čtyři horizontální gravitační separační bubny. Zde se pára sbírá dvěma parosběrnými kolektory a osmi parovody je odváděna k turbínám kondenzačního typu. Pára prochází ze závěrných a regulačních ventilů do vysokotlaké části turbíny. Odtud se dostává do separačně-přehřívacích mezistupňů, kde se odděluje a přehřívá čerstvou párou, a poté pokračuje do čtyř nízkotlakých cylindrů, odkud se sbírá do kondenzátorů chlazených vodou. Kondenzát páry, která vykonala práci v turbíně, se shromažďuje a čerpá do čistícího zařízení kondenzátu, kde prochází chemickou očištěnou, aby byla zajištěna potřebná kvalita napájecí vody. Čerpadla kondenzátu druhého stupně dodávají kondenzát do deaerátorů přes regeneraci. Pět nízkotlakých přehříváčů přehřívá páru mezi jednotlivými stupni turbíny a kondenzát teplé páry se kaskádově mísí s proudem hlavního kondenzátu. V energobloku jsou čtyři deaerátory, které odstraňují korozně aktivní plyny z kondenzátu a slouží jako zásobárna napájecí vody. Napájecí voda se čerpá z deaerátorů do separačních bubnů přes napájecí uzly. Každý uzel má tři cesty, dvě pracovní a jednu rezervní, s mechanickými filtry a automatickými ventily pro regulaci množství vody v separačních bubnech. Pro případ odstavení turbíny existují mechanismy pro sběr a jímání vznikající páry. Vodně-chemický režim okruhu KMPC se udržuje pomocí průtokové filtrace s kapacitou 200 t/h. Voda se odebírá z ok-

ruhu u tlakových kolektorů hlavních cirkulačních čerpadel každé smyčky, ochlazuje se v regenerátorech a doochlazovačích na 50 °C a poté se vrací zpět do okruhu, přičemž se ohřívá vodou přicházející do filtrace. [22]

Všechny důležité části popsány v tomto odstavci můžeme sledovat na obrázku 7. a detailní popis tohoto obrázku se nachází v tabulce 5.



Obrázek 7: Schéma principu elektrárny. [23]

1. Reaktor RBMK-1000	2. Turbína K-500-65
3. Generátor	4. Separační buben
5. Hlavní cirkulační čerpadlo	6. Tlakový kolektor
7. skupinový rozdělovací kolektor	8. Závěrně regulační ventil
9. Průtokoměr "ŠTORM"	10. Kondenzátor
11. Čerpadlo kondenzátu 1. stupně	12. Očistka kondenzátu
13. Čerpadlo kondenzátu 2. stupně	14. Nízkotlaký přehříváč
15. Deaerátor	16. Napájecí čerpadlo
17. Malé napájecí čerpadlo	18. Filtr
19. Vysokotlaký okruh	20. Redukční zařízení
21. Separátor – přehříváč páry	22. Nádrž – barbater
23. Technologický kondenzátor	24. Čerpadlo kondenzátu
25. Hlavní ochranný ventil	26. Cirkulační čerpadlo
27. Vypouštěcí šachta	28. Čerpadlo ochlazování
29. Regenerátor (SPIR)	30. Doochlazovač (SPIR)
	31.

Tabulka 5: Popis schématu principu elektrárny.

1.5.2 Reaktor RBMK 1000

Reaktor RBMK, byl vyvinut v 60. letech 20. století. Celým názvem Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj, což znamená kanálový reaktor vysokého výkonu. Tento lehkvodní grafitový reaktor se používá výhradně na území bývalého Sovětského svazu. [20]

Reaktor RBMK-1000 byl instalován ve všech čtyřech blocích v Černobylské jaderné elektrárně a měl být použit i v nedostavěném 5. a 6. bloku. Po nehodě na 4. bloku černobylské elektrárny se však přestalo s výstavbou reaktoru tohoto typu a dále už se nevyrobí. Celkem bylo postaveno 17 reaktorů tohoto typu, z nichž 11 je stále v provozu (jaderné elektrárny: Kursk - 4 bloky, Leningrad - 4 bloky, Smolensk - 3 bloky). Tyto reaktory byly po černobylské havárii výrazně modernizovány a do roku 2025 by měly být z provozu vyřazeny. [22]

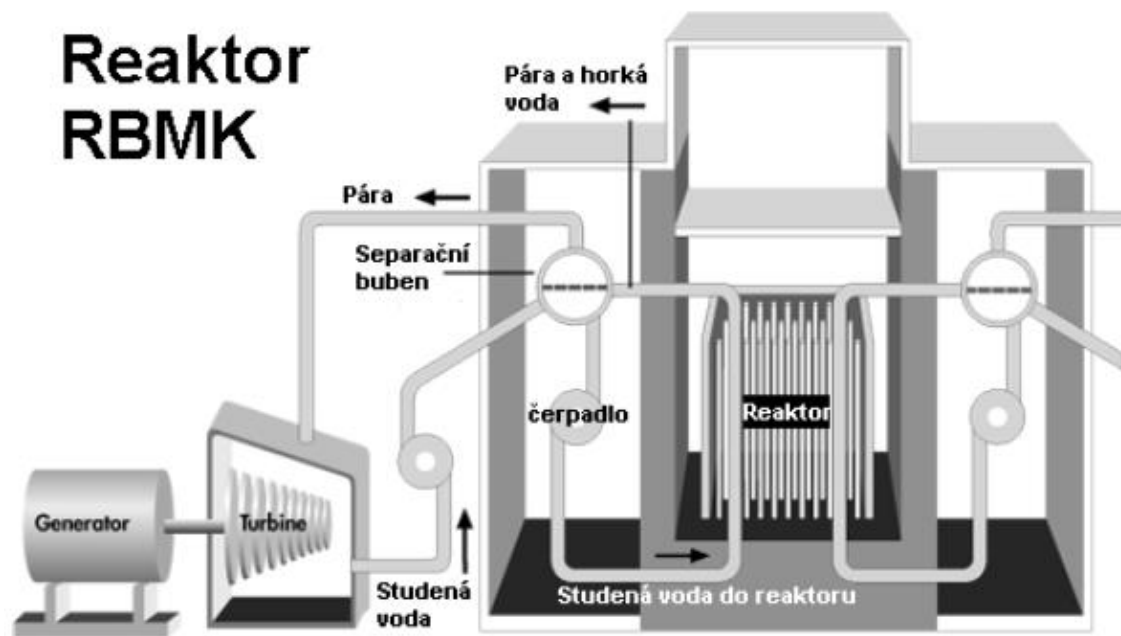
1.5.2.1 Hlavní charakteristika

Reaktor RBMK-1000 má tepelný výkon 3200 MW a pracuje s grafitem jako moderátorem, lehkou vodou jako chladivem a oxidem uranitým jako palivem. Je složen z řady vertikálních kanálů, které jsou umístěny v kruhových otvorech grafitových kolón, a horní a dolní ochranné desky. Celý reaktor má cylindrický tvar a obaluje jej grafitová vyzdívka, která se skládá z bloků grafitových kolón s kruhovými otvory. Spodní deska podepírá celý reaktor a palivové i řídicí kanály procházejí přes horní a dolní kovovou konstrukci. Regulační tyče jsou nad aktivní zónou a přívod k nim je v prostoru nad vrchní konstrukcí reaktorového sálu. [22]

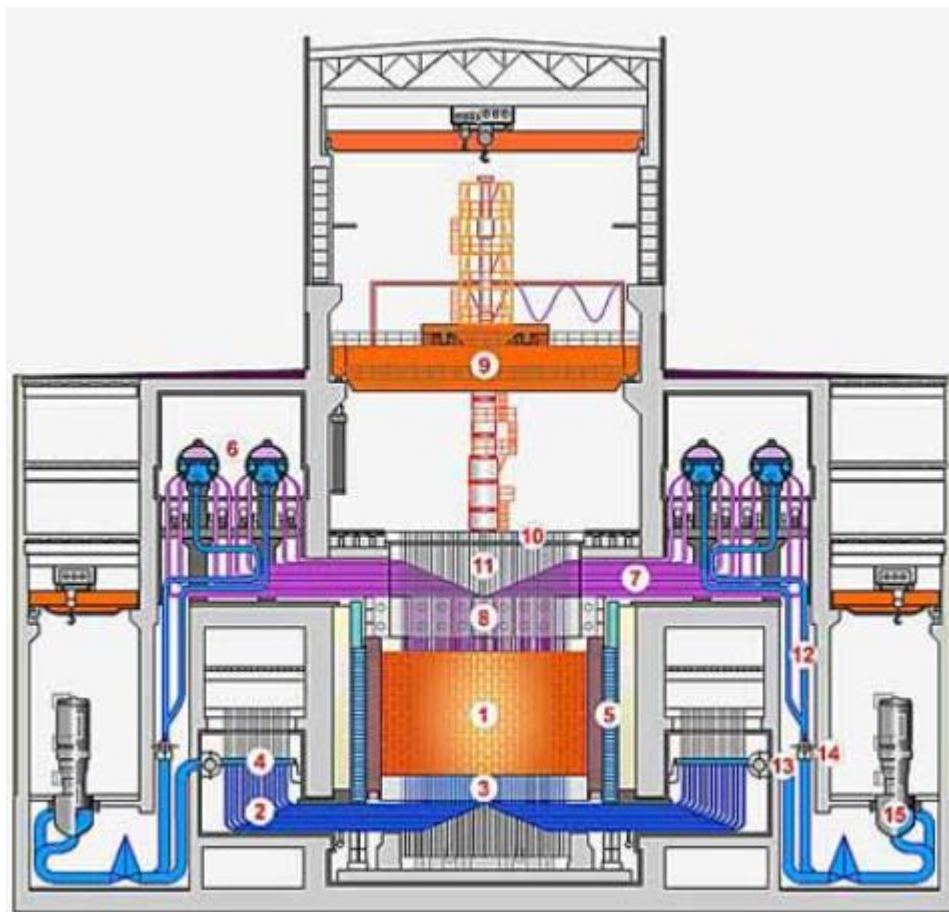
Palivo je uloženo v zirkon-niobových obalech, a má formu tablet. Tyto tablety (Tvely) jsou seskupeny do teplovydávajícího svazku, který se skládá z 18 tvel. Tyto svazky se spojují v teplovydávající kazety, které se umísťují do palivového kanálu. Výměna paliva se provádí během provozu reaktoru pomocí speciálního zavážecího stroje v reaktorovém sále a za den se mohou vyměnit 1-2 palivové kanály (Mould, 2000).

Asi 95% energie, která se uvolní během štěpné reakce, se předá chladivu. Zbývajících 5 % výkonu reaktoru se uvolní v grafitu při snižování rychlosti neutronů a pohlcování záření gama. Aby se zlepšil přenos tepla a aby se snížila oxidace grafitu, je skrz grafitovou výplň cirkulována směs dusíku a argonu. To slouží také ke kontrole pevnosti kanálů, kontrole teploty a vlhkosti plynu, který vychází z prostoru. Pod spodní i nad vrchní deskou jsou prostory, ve kterých jsou umístěny rozvodné komunikace vody od rozdělovacích kolektorů ke každému kanálu a parovodních komunikací z kanálů do separačních bubnů. [22]

Detailní vzhled reaktoru RBMK můžeme sledovat na obrázcích 8. a 9. Tabulka 6, slouží jako doplnění popisu k obrázku 9.



Obrázek 8: Reaktor RBMK – 1000. [23]



Obrázek 9: Příčný řez zařízením reaktoru. [23]

1. Aktivní zóna	2. Potrubí vodních komunikací
3. Spodní biologická ochrana	4. Rozdělovací kolektor
5. Boční biologická ochrana	6. Separční buben
7. Potrubí parovodních komunikací	8. Vrchní biologická ochrana
9. Zavážecí stroj	10. Odnímatelná desková podlaha
11. Trakty palivových kanálů	12. Spouštěcí kanály
13. Tlakový kolektor	14. Sací kolektor
15. GCN – hlavní cirkulační čerpadlo	

Tabulka 6: Popis příčného řezu zařízením reaktoru.

1.5.2.2 Charakteristika jaderného reaktoru RBMK – 1000

Reaktor RBMK je varný reaktor chlazený vodou a používá grafit jako moderátor. Tento ocelový válec má průměr 10 metrů a výšku 7 metrů. Reaktor je vyroben z kvalitního grafitu a je umístěn v betonové jámě. Na horní a spodní části reaktoru se nacházejí silné betonové panely sloužící jako biologické štíty. Palivem je téměř přírodní uran-238 nebo uran obohacený na 2 až 3 procenta uranu-235, uložený v palivových tyčích dlouhých přibližně 3,5 metru v tlakových kanálech. Karbid boru tvoří regulační tyče, které při zasunutí do jádra reaktoru pohlcují neutrony a zpomalují štěpnou reakci, nebo naopak reakci zrychlují, pokud jsou tyče vytaženy. Dvě chladicí smyčky zajišťují cirkulaci vody ohřáté energií z jaderného štěpení, přičemž voda putuje do parních bubnů, kde se odděluje pára od vody, a pára pohání turbínu, čímž vzniká elektrická energie. Voda se pak vrací zpět do reaktoru. [22]

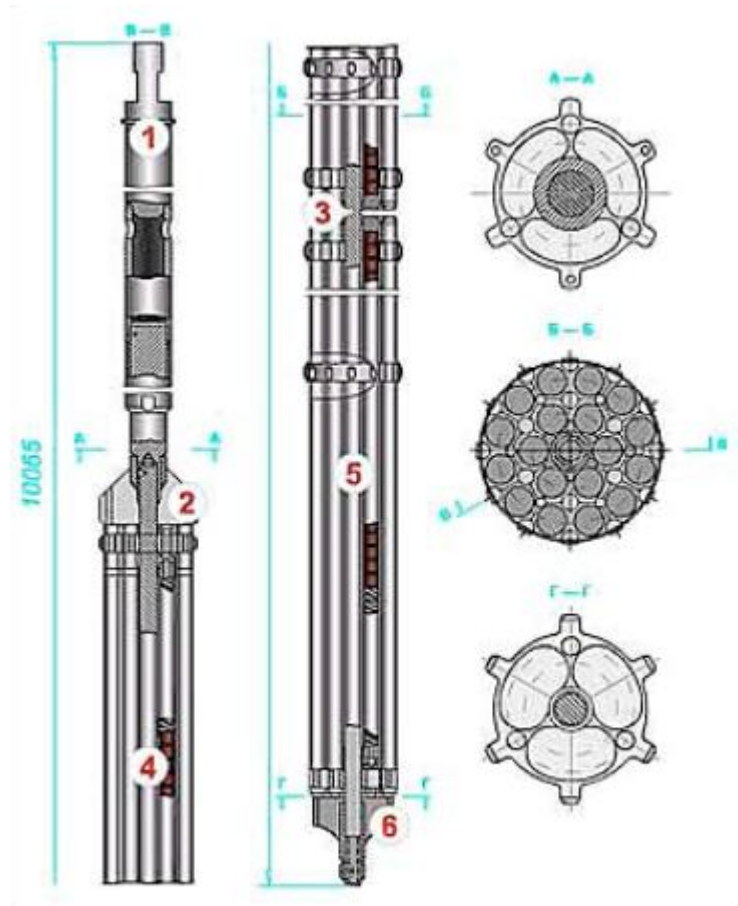
Reaktor měl i své konstrukční problémy. Zjistilo se, že pokud jsou regulační tyče zasunuty méně než 2 metry, může dojít k tzv. efektu pozitivní reakce, který zvyšuje štěpnou reakci a výkon reaktoru, což ho činí nestabilním a nebezpečným. Dalším nedostatkem byla absence ochranného betonového krytu (kontejnmentu), který by v případě nehody zabránil šíření radiace. [20]

Mezi výhody reaktoru patří absence sekundárního okruhu, což umožňuje, aby se pára produkovala přímo v primárním okruhu a rovnou poháněla turbíny. Další výhodou je možnost výměny paliva během provozu bez nutnosti reaktor odstavit. [20]

1.5.2.3 Palivová kazeta

Palivová kazeta (obrázek 10. a tabulka 7.) se skládá ze dvou palivových svazků, fixačního dílu, koncovky a prodlužovací tyče, které jsou upevněny na nosný prut. Palivový svazek obsahuje 18 teplovodivých elementů (tvelů), které jsou drženy distančními a koncovými mřížkami. Tvel (obrázek 11. a tabulka 8.) je tvořen tabletami spečeného oxidu uraničitého, které jsou umístěny v hermeticky uzavřeném obalu ze zirkonové oceli. Pro kompenzaci teplotní roztažnosti paliva a snížení vzájemného termomechanického působení s obalem mají tabletky na jedné straně jamku a na druhé výstupek. Tvely jsou

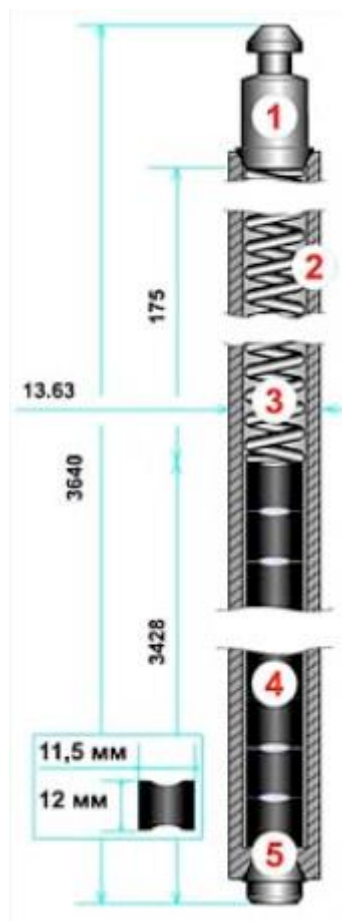
hermeticky uzavřeny přivařením koncovky na jednom konci trubice a víčka na druhém konci kontaktním svarem. Během výroby je vnitřní prostor naplněn heliem. Tabletky jsou v trubici zajištěny pružinou na jedné straně. Prodlužovací tyč palivové kazety končí úchytem s uzávěrem, který umožňuje manipulaci s kazetou při jejím vyjímání a vkládání do kanálu, zajišťuje hermetizaci kanálu a chrání prostor nad reaktorem před zářením. [20]



Obrázek 10: Palivová kazeta. [23]

1. Úchyt	2. Fixační díl
3. Nosný prut	4. Horní palivový svazek
5. Spodní palivový svazek	6. Koncovka

Tabulka 7: Popis palivové kazety.



Obrázek 11: TVEL. [23]

1. Koncovka	2. Obal
3. Fixační pružina	4. Palivové tablety
5. Uzávěr	

Tabulka 8: Popis TVELU.

1.6 Havárie

V noci z 25. na 26. dubna 1986 bylo na pracovišti čtyř prvních reaktorů černobylské jaderné elektrárny přítomno 176 členů obsluhujícího personálu, včetně zaměstnanců různých oddělení a opravárenského týmu. Navíc na staveništi třetí etapy elektrárny pracovalo během noční směny 268 dělníků a montérů. [20]

K havárii čtvrtého bloku černobylské elektrárny (26. dubna 1986) nedošlo během běžného provozu reaktoru, ale při experimentu zaměřeném na studium a ověřování bezpečnosti reaktorů v různých situacích. Experiment byl plánován při nízkém výkonu reaktoru a měl probíhat v souladu s postupem pro rychlé ochlazování reaktoru. Reaktory

obvykle slouží nejen k výrobě elektřiny, ale i k napájení čerpadel chladicího systému. Tuto energii mohou čerpat i z jiných dostupných zdrojů. Pokud dojde k přerušení napájení, lze část elektřiny vyráběné reaktorem využít pro chladicí systémy. Pokud však reaktor elektřinu nevyrábí, což se děje při jeho rychlém odstavení, chladicí systémy potřebují externí zdroj energie – generátor. Spuštění generátoru však trvá nějaký čas, během kterého chybí potřebná energie. Experiment měl ověřit, zda výkon generovaný setrvačností rotující turbíny po rychlém odstavení reaktoru postačí k napájení oběhového čerpadla chladicí kapaliny a zajistí bezpečné ochlazování reaktoru. [20]

1.6.1 Průběh havárie

25. DUBNA 1986 – PÁTEK

01:00 h

Spuštění plánovaného odstavení bloku IV. Snižování výkonu jaderného reaktoru. Před odstavením měl být proveden jednoduchý pokus, který měl zjistit, zda turbogenerátor bude po rychlém zastavení dodávky páry možné napájet čerpadly pro havarijní chlazení aktivní zóny reaktoru pouze s využitím svého setrvačného pohybu. [24]

13:00 h

Od brzkých ranních hodin se postupně snižuje tepelný výkon jaderného reaktoru ze 3200 MW na 1600 MW. Tým jaderných inženýrů se připravuje na plánovaný experiment. Vypnutím jedné turbíny a potlačení výkonu bloku č. 4 jaderné elektrárny. Kvůli správnému provedení zkoušky odpojují operátoři systém havarijního chlazení reaktoru, aby se během testu nespustil. [24]

14:00 h

Dispečer Ukrajinských energetických závodů požaduje odložení plánované zkoušky. Je třeba, aby energie ze 4. bloku byla dodána do elektrické sítě. Proto byl vydán rozkaz k dočasnému odložení zkoušky. Reaktor i nadále funguje se sníženým tepelným výkonem 1600 MW, a i když to není v souladu s předpisy, systém havarijního chlazení reaktoru zůstává odpojen. [24]

16:00 h

Střídání směn. Ranní směna opouští elektrárnu a nastupuje odpolední směna. [24]

23:10 h

Po 9 hodinách od odložení zkoušky byl vydán rozkaz k pokračování v experimentu. Snižuje se tedy tepelný výkon reaktoru na 700 MW, což je úroveň, při které by měl být experiment podle předpisů prováděn. [24]

26. DUBNA 1986 – SOBOTA

00:00 h

Tepelný výkon reaktoru klesá na předem určených 700 MW. Odpolední směna je vystřídána noční směnou Alexandra Akimova. Zkoušku měl mít původně na starosti tým jaderných inženýrů, ti ale odcházejí z odpolední směny domů a na noční směně zůstávají jen elektrotechnici, kteří navíc nejsou dostatečně připraveni na provedení experimentu. [24]

00:31 h

Tepelný výkon reaktoru krátce dosahuje 700 MW, ale následkem několika chyb obsluhy rychle klesá pod 500 MW. Leonid Toptunov, který odpovídá za regulaci výkonu, spolu s Alexandrem Akimovem upozorňují svého nadřízeného Anatolye Djatlova na prudký pokles výkonu, který je pod bezpečnostní hranicí 700 MW. Djatlov však přikazuje pokračovat ve snižování výkonu na 200 MW, i když minimální bezpečnostní limit pro tento typ reaktoru (RBMK) je mezi 700-1000 MW. Djatlov si je toho vědom, ale věří, že riziko je zanedbatelné, a proto trvá na svém rozhodnutí se slovy: „Reaktory nedělají chyby, lidé ano!“ Toptunov a Akimov se podřizují a pokračují ve snižování výkonu. [24]

00:36 h

Rozeznívá se poplach, hladina vody v odlučovačích je kriticky nízká. Tento varovný signál indikuje, že při nízkém tepelném výkonu je do aktivní zóny reaktoru čerpáno příliš mnoho chladicí vody. Důsledkem je nedostatečné ohřátí velkého množství studené vody, což vede k produkci malého množství páry s nízkým tlakem. Tato pára je odváděna z reaktoru do odlučovačů, kde se zbavuje přebytečné vody, a následně je čistá pára využívána k pohonu turbín. Boris Stoljarčuk, který reguluje tok vody reaktorem, tento problém snadno zvládá – poplach vypíná a ignoruje. Za normálních okolností by se aktivoval systém havarijního chlazení, který je však nyní úmyslně vypnutý. [24]

00:38 h

Výkon klesá na 200 MW, ale Toptunov ho nedokáže udržet a výkon nadále klesá až na pouhých 30 MW, což prakticky znamená zastavení štěpné reakce. Při takto nízkém výkonu výrazně stoupá koncentrace Xenonu 135, který absorbuje neutrony a způsobuje Xenonovou otravu. V tuto chvíli by měla obsluha, podle školení, okamžitě ukončit zkoušku a reaktor odstavit na alespoň 24 hodin, po kterých by bylo možné reaktor bezpečně znovu spustit. To se však nestalo, což se ukázalo jako osudová chyba. Anatoly Djatlov nařídí Toptunovovi, aby pro obnovení výkonu úplně vytáhl řídicí tyče z aktivní zóny reaktoru. Toptunov však namítá: „Měli bychom reaktor odstavit, tak jak nás to učili při školení.“ Akimov přistoupí a souhlasí, protože pokud se řídicí tyče vytáhnou, ztratí se úplná kontrola nad výkonem reaktoru. Situace je již nyní kritická a nemělo by se pokračovat. Djatlov však trvá na svém rozhodnutí. Operátoři se podřizují a dávají pokyn k vytažení řídicích tyčí. [24]

01:00 h

Tepelný výkon se stabilizoval na 200 MW. I když za těchto podmínek předpisy zakazují provoz reaktoru, obsluha musí na příkaz Djatlova pokračovat v práci. [24]

01:10 h

Znovu se ozývá poplach, hladina vody v odlučovačích je kriticky nízká. Poplach se opět vypíná a přehlíží. [24]

01:22 h

Před spuštěním zkoušky si operátoři nechávají pomocí počítačového systému SKALA zobrazit dokument s aktuálním stavem reaktoru. Zjistí, že reaktor je mimo bezpečné parametry, což naznačuje nutnost jeho odstavení. I přes tuto situaci se operátoři včetně Djatlova rozhodnou pokračovat v testování. Boris Stoljarčuk přiřazuje k šesti hlavním cirkulačním čerpadlům, která dodávají chladící vodu do aktivní zóny reaktoru, také zbývající dvě záložní čerpadla. Toto rozhodnutí má zajistit, že po ukončení zkoušky bude aktivní zóna reaktoru dostatečně chlazená. Zvýšený tok vody skrz reaktor způsobuje ještě menší produkci páry a tlaku, než je nezbytné. [24]

01:23:04 h

Zahájení bezpečnostní zkoušky. Řídicí panel nesděluje operátorům aktuální nestabilní stav reaktoru. Reaktor momentálně generuje tepelný výkon 200 MW. Operátoři přerušují dodávku páry do turbíny, která nyní zajišťuje pohon čerpadel chladícího systému, a následně se dopouštějí několika chyb. Deaktivují různé bezpečnostní mechanismy, někdy i násilně, a výrazně snižují průtok vody do reaktoru. Xenon, zodpovědný za otrávení reaktoru, postupně ustupuje. Tlak páry a tepelný výkon začínají stoupat. [24]

01:23:30 h

Výkon reaktoru prudce narůstá, což způsobuje zvýšení teploty a tlaku v jádře reaktoru. Tlak páry v jádře je vyšší než tlak chladící vody, která je dodávána pomocí čerpadel. Tento rozdíl tlaku způsobuje postupné snižování činnosti čerpadel, a nakonec může vést k úplnému přerušení chlazení jádra reaktoru. Rostoucí tlak dokonce začíná vytvářet tlakové síly, které působí na uzávěry palivových tyčí. V důsledku extrémních podmínek v jádře reaktoru, jako je vysoká teplota a tlak, může docházet k deformacím materiálů. [24]

01:23:40 h

Náhly nárůst výkonu, který dosáhl až 1600 MW, donutil obsluhu stisknout tlačítko AZ-5 a aktivovat havarijní ochranu k odstavení reaktoru. Po aktivaci se začaly pomalu zasouvat vysunutá řídicí tyče do aktivní zóny. Nicméně kvůli deformacím, které se odehrávaly uvnitř, se tyče nedostaly do požadované polohy. Výkon reaktoru se tak nadále prudce zvyšoval, až na desetinásobek původní konstrukční hodnoty. Jádro se rozpálilo

na bílo. Obrovský tlak páry roztrhl potrubí a dostal se do kontaktu s rozpáleným jádrem, což okamžitě způsobilo rozklad páry na vodík a kyslík. [24]

01:23:47 h

Nastává první výbuch kvůli výbušné směsi vodíku a kyslíku, což vede k vyhození 1200 tun těžkého ocelového víka z reaktoru a prorážení střechy haly. Palivo uvnitř reaktoru se vysokým žárem hroutí do sebe a následně dochází k druhé, mnohem silnější explozi. Vědci později zjistili, že síla této druhé exploze byla obrovská, ekvivalentní výbuchu 300 až 500 tun TNT. Tato exploze byla způsobena částí paliva, která dosáhla kritického stavu a vyvolala rychlé uvolňování energie, přibližující se výkonu atomové bomby. Svědci pozorovali jasný modrobílý záblesk, což naznačuje extrémně vysokou teplotu, překračující 6000 °K, což není možné dosáhnout konvenčními trhavinami, což jasně ukazuje na atomový výbuch. [24]

1.6.2 Příčiny havárie

Příčinou nehody byla velmi nepravděpodobná kombinace technických nedostatků reaktoru a zásahů do provozu, které provedl personál (KARPAN, 2001).

Podstata selhání lidského faktoru spočívá v tom, že v noci 26. dubna 1986 zaměstnanci čtvrtého bloku černobylské elektrárny během přípravy a provádění testu šestkrát zřetelně porušili předpisy pro bezpečný provoz reaktoru. Navíc úmyslně odpojili téměř všechny automatické prostředky havarijní ochrany. Podle platných nařízení bylo zakázáno zasahovat do činnosti ochranných a automatizačních systémů, pokud tyto systémy neprojeví vlastní chybu. Kvůli těmto zásahům se reaktor dostal do nestabilního stavu a v určitý moment v něm začala nekontrolovatelná řetězová reakce, která vyústila v tepelný výbuch reaktoru. [20]

Byly také zmíněny další přestupky, jako je nedbalost při řízení reaktoru, nedostatečné porozumění technologickým postupům v jaderném reaktoru ze strany zaměstnanců a ztráta pocitu nebezpečí u operátorů. [20]

Technickými nedostatky reaktoru jsou myšleny specifické vlastnosti konstrukce reaktoru RBMK, které napomohly personálu k rozvoji havárie do rozměru katastrofy. Vývojáři reaktoru nevybavili zařízení takovými bezpečnostními systémy, které by mohly předejít nehodě, protože byli přesvědčeni, že k takové souhře událostí nemůže dojít. Nečekali, že by někdo úmyslně "deaktivoval ochranu" a "porušil pravidla". [20]

V roce 1991 Druhá Státní komise, složená převážně z odborníků, předložila další vysvětlení černobylské havárie. Podstata tohoto vysvětlení spočívala v tom, že reaktor čtvrtého bloku měl několik konstrukčních nedostatků, které přispěly k jeho explozi. Mezi hlavní nedostatky patřil pozitivní koeficient reaktivity a přítomnost až metrových grafitových bloků na koncích tyčí. Tyto bloky absorbovaly neutrony méně účinně než voda, což při jejich současném zavedení do aktivní zóny (po stisknutí AZ-5) změnilo funkci vody při regulaci dodatečné pozitivní reaktivity natolik, že zbývajících 6-8 řídicích tyčí to nedokázalo vykompenzovat. V reaktoru se rozběhla nekontrolovaná řetězová reakce, která vedla k tepelné explozi. Lokální tepelné zatížení palivových kazet tak

překročilo limity mechanické pevnosti, což způsobilo masivní poškození palivových kanálů, tavení palivových článků a následné uvolnění horního víka reaktoru. To byl první nevratný krok k následné katastrofě. [22]

Havárie je také připisována nedokonalé konstrukci reaktoru, jeho neintuitivním vlastnostem, nedodržení podmínek plánovaného experimentu a celkovému nedostatku bezpečnostní kultury. Stejně jako v případě Three Mile Island byl dalším faktorem přispívajícím k nehodě nedostatečný výcvik a obeznamenost provozních pracovníků elektrárny s mnoha vlastnostmi reaktoru. [22]

Jedním z problémů byla také nedostatečná komunikace mezi vedoucími bezpečnostními pracovníky a operátory během nočního experimentu. Navíc kvůli nedostatečnému proškolení operátoři plně nerozuměli fungování reaktoru při nízké reaktivitě. V rámci experimentu bylo několik bezpečnostních systémů deaktivováno. Cílem experimentu bylo zjistit, zda elektrický generátor poháněný parní turbínou dokáže po rychlém uzavření přívodu páry do turbíny setrvačností ještě asi 40 sekund napájet čerpadla havarijního chlazení. [20]

Mnoho technických aspektů reaktoru bylo považováno za vojenská tajemství, takže operátoři o nich neměli žádné informace. Reaktor měl obzvláště nebezpečně vysoký kladný dutinový koeficient reaktivity. Další významnou vadou reaktoru byla konstrukce jeho regulačních tyčí. Tyto tyče nebyly úplně kompaktní, protože jejich spodní část byla částečně dutá. Když se zasouvaly, chladicí kapalina byla na několik sekund nahrazena dutými částmi tyčí. Vzhledem k tomu, že chladicí kapalina (voda) absorbuje neutrony, došlo v této chvíli ke zvýšení výkonu reaktoru kvůli menšímu množství vody jako absorbátoru. Toto neintuitivní chování reaktoru při zasouvání regulačních tyčí operátoři vůbec neznali. [20]

Na základě těchto skutečností lze vyvodit tyto závěry:

- Hlavní příčinou černobylské katastrofy bylo neodborné chování pracovníků páté směny čtvrtého bloku elektrárny. Tito zaměstnanci neznali správné postupy pro zasouvání řídicích tyčí do aktivní zóny reaktoru. Tento nedostatek vedl k nekontrolovatelné řetězové reakci, která vyústila v tepelnou explozi reaktoru. [20]
- Jaderný reaktor nesplňoval současné bezpečnostní standardy, a to jak z hlediska fyzikálního principu jeho fungování, tak z pohledu nízké úrovně automatizační techniky. Takový typ reaktoru by dnes nebyl nikde na světě povolen k výstavbě. [20]
- Havárie byla také významně ovlivněna lidskými chybami na všech úrovních. Provozní personál nedodržoval bezpečnostní omezení a předpisy, což vedlo k profesním selháním. [20]
- Experiment, který bezprostředně způsobil havárii, byl koncipován jako čistě elektrotechnická záležitost bez ohledu na jadernou bezpečnost. Z toho důvodu jej řídili elektrotechnici místo specialistů na jadernou bezpečnost a provozní režimy. [20]

- Havárie měla také prvek náhody. Odstavení reaktoru a zahájení experimentu byly neočekávaně odloženy o devět hodin kvůli potřebě elektrické energie v továrnách před svátkem 1. máje. [20]
- Zpoždění experimentu znamenalo, že jej prováděla jiná směna než ta, která byla původně připravena. Noční směna měla méně zkušené operátory, kteří nebyli na experiment připraveni. [20]
- Vínou za havárii nese i vedení elektrárny, které se podřizovalo direktivním a často politicky motivovaným rozhodnutím nadřízených orgánů. Negativní vliv mělo i utajování informací o jaderné energetice, což bylo pro tehdejší sovětský režim typické. [20]
- Spekuluje se také o dalších příčinách havárie. Některé zdroje tvrdí, že čtvrtý blok reaktoru byl uveden do provozu i přes neúspěšné bezpečnostní testy kvůli snaze splnit plán před termínem. [20]

Na základě těchto skutečností lze konstatovat, že příčinou černobylské havárie byla souhra více navzájem se ovlivňujících faktorů.

1.6.3 Následky havárie

Kvůli černobylské havárii došlo k masivnímu úniku radionuklidů do atmosféry, což vedlo k radioaktivní kontaminaci životního prostředí. Tato kontaminace zasáhla mnoho evropských zemí, přičemž nejhorší situace byla v Bělorusku, Ruské federaci a na Ukrajině, tedy v zemích bývalého Sovětského svazu. Radionuklidy se postupně přenášely z atmosféry do půdy a vody. Hlavní emise z čtvrtého bloku černobylské jaderné elektrárny trvaly prvních deset dní a zahrnovaly radioaktivní plyny, kondenzované aerosoly a velké množství částic paliva. Celkové emise radioaktivních látek činily přibližně 14 EBq, z čehož 1,8 EBq bylo izotopu ^{131}I , 0,085 EBq izotopu ^{137}Cs a dalších radionuklidů cesia, 0,01 EBq izotopu ^{90}Sr a radioizotopů plutonia. Inertní plyny tvořily asi 50 % úniku radioaktivních látek. [18]

Havárie způsobila uvolnění velkého množství radionuklidů a radioaktivních vzácných plynů. Radioaktivní látky se šířily ve formě aerosolů a postupně se usazovaly na povrchu. Vzácné plyny se rozptýlovaly v atmosféře a nepřispívaly k znečištění oblastí blízko místa havárie. Kontaminace byla velmi nerovnoměrná, což záviselo na směru větru v prvních dnech po nehodě. Spad byl také výrazně ovlivněn dešťovými srážkami. Stroncium a plutonium se usazovaly do vzdálenosti 100 km od reaktoru, protože byly obsaženy převážně ve větších částicích, zatímco jód a cesium se rozšířily na větší území. [18]

Emise z černobylské havárie zasáhly rozsáhlé oblasti Evropy. Území o rozloze více než 200 000 km² bylo kontaminováno radioaktivním cesiem (^{137}Cs , více než 0,04 MBq na m²), přičemž 71 % této oblasti zahrnovalo tři nejvíce postižené země – Bělorusko, Ruskou federaci a Ukrajinu. [18]

Procentuální podíl kontaminace všech zasažených evropských zemí můžeme pozorovat v tabulce 9.

STÁT	%
Rakousko	2,1
Bělorusko	23
Belgie	0,02
Velká Británie	0,83
Maďarsko	0,24
Německo	1,8
Řecko	1,1
Dánsko	0,02
Irsko	0,33
Španělsko	0,05
Itálie (Sicílie bez)	0,9
Lotyšsko	0,09
Litva	0,38
Lucembursko	0,01
Moldova	0,53
Nizozemsko	0,02
Norsko	3,1
Polsko	0,63
Rusko (evropská část)	30,3
Rumunsko	2,4
Slovensko	0,28
Slovinsko	0,52
Turecko	0,16
Ukrajina	18,18
Finsko	4,8
Česká republika	0,54
Švédsko	4,6
Švýcarsko	0,43

Tabulka 9: Podíly kontaminace z černobylské havárie v Evropě. [18]

2 Komparace událostí, seriál x realita

Tato kapitola je rozdělena do čtyř větších celků dle časové posloupnosti a s ohledem na zaměření studijního oboru. První celek se tedy zabývá prvotním havarijním opatřením, zejména pak způsobem likvidace produkce kouře, záření a radioaktivního popela z vybuchlého reaktoru. K tomu se řadí i nesrovnalosti ohledně havárie vrtulníku. Druhým celkem popsáním v této kapitole je hrozba druhotné exploze a s ní související hrozba protavení koría. Díky této hrozbě dochází k vyhloubení tunelu pod reaktorem. V neposlední řadě se zde řeší vznik tzv. sloní nohy. Třetím zkoumaným celkem je odstraňování radioaktivních trosků ze střechy reaktoru 3. bloku a s tím související likvidátoři. Čtvrtý celek je věnovaný vlivu ozáření na lidský organismus. Konkrétně se v něm rozebírá průběh akutní nemoci z ozáření u jednoho z hasičů, osud lidí ze železničního mostu a skutečný význam igelitových stanů v nemocnici. Tyto vybrané celky jsou zde podrobeny revizi se zásobou informací, jež bylo možné dohledat z jiných zdrojů.

2.1 Prvotní havarijní opatření

Jako první na místo havárie dorazily jednotky hasičů. V seriálu je jejich příjezd zaznamenán v 1:30 h. ráno, tedy zhruba 7 min. po výbuchu. Tyto jednotky byly tvořeny hasičským sborem sídlícím přímo v jaderné elektrárně a postupně byly doplňovány dalšími sbory z okolí. Hasičům se povedlo vodou uhasit viditelné plameny požáru konstrukce, nicméně jádro štěpného reaktoru stále chrlí do ovzduší radioaktivní kouř. [21]

Problém radioaktivního záření, kouře a popela vycházejícího z jádra reaktoru (obr. 12), řeší Valerij Legasov tímto způsobem. Rozhoduje se pro využití směsi bóru s pískem, kterou nechá shazovat na jádro reaktoru za pomoci vrtulníků. Potřebné množství směsi písku a bóru je odhadováno na 5000 tun. Jak je uvedeno v seriálu, ráno 27. dubna, 30 hodin po explozi, začíná „hašení“ jádra reaktoru. Vrtulníky nemohou vletět přímo nad žhnoucí reaktor, ale musí dodržovat bezpečnou vzdálenost deseti metrů od reaktoru. K „uhašení“ se tak využívá síly větru, který by měl shozenou směs dopravit přímo do reaktoru. To však celou akci komplikuje, protože pravděpodobnost dopravení směsi na místo určení se tímto snižuje, což vede k navýšení počtu letů vrtulníků a větší spotřebě směsi. [21]



Obrázek 12: Stoupající kouř z havarovaného reaktoru. [21]

V tento moment se v seriálu setkáváme s důležitým odklonem od reality. Jak je zmíněno, k zastavení produkce popela a kouře vycházejícího z jádra reaktoru je využíváno směsi písku a bóru. To však není zcela přesné. Ve skutečnosti se toho využívalo mnohem více. [21]

V jednom z mnoha zdrojů zabývajících se touto problematikou je tato situace popsána takto. Vojáci vlastnoručně shazují z vrtulníku do reaktoru 80 kilové pytle s pískem a kyselinou boritou. Domnívají se, že tímto způsobem se jim podaří požár zadusit a kyselina dokáže zneutralizovat radiaci. Celková hmotnost shozeného písku s kyselinou je 6000 tun. Takto vytvořená zátka ze směsi písku a kyseliny borité se vlivem žáru vycházejícího z hořícího paliva začíná tavit a na povrchu se vytvářejí praskliny. Z toho důvodu je rozhodnuto na tuto vrstvu shodit ještě 2400 tun olova, které by mělo zabránit únikům radiace a snížit teplotu žhavého paliva. [25]

Další zdroj uvádí, že proces pohřbení reaktoru byl zahájen shazováním písku, olova, jílu a bóru ze vzduchu. Celkově bylo na reaktor shozeno kolem 5000 tun různých látek. Většinu z nich tvořil písek, ten byl za potřebí k uhašení grafitového ohně. Olovo ke snížení teploty hořícího grafitu. A bór a jíl, aby se zabránilo řetězové reakci. Někteří vědci se však pokoušeli Legasova přesvědčit, že řetězová reakce je teoreticky vyloučena, protože palivové kanály byly zničeny a jediné k čemu uvnitř reaktoru docházelo bylo hoření grafitu. A proto nebyl bór nutný. [20]

Je tedy zřejmé, že na reaktor bylo shazováno mnohem více látek, než je uvedeno v samotném seriálu od HBO.

Látky shazované na reaktor

Kyselina boritá H_3BO_3

Velmi dobře absorbuje neutrony. Proto se kyselina boritá přidává do chladicí kapaliny primárního okruhu tlakových jaderných reaktorů, kde slouží k regulaci výkonu reaktoru.

Promícháváním chladicí kapaliny se koncentrace kyseliny borité vyrovnává v celém objemu reaktoru, což rovnoměrně reguluje štěpnou řetězovou reakci. Proto zde byla kyselina boritá (H_3BO_3) použita, aby zabránila štěpné reakci. Její nebezpečí ale spočívá v tom, že je agenturou ECHA zařazena na seznam látek toxických pro reprodukci. [26]

Jíl a písek

Měli díky své teplotní odolnosti sloužit jako vrstva, která by v dostatečném množství zakryla otevřené jádro reaktoru. Mezi hlavní složku písku a jílu patří křemen, jehož teplota tání se pohybuje okolo 2000 °C. Zасыпání taveniny vytvořené v jádře reaktoru by se zamezilo dalšímu unikání kouře a popela do atmosféry. [27]

Olovo

Olovo s vysokým atomovým číslem, se vyznačuje vysokou měrnou hustotou 11 340 kg/m³. Díky této velké hustotě elektronů je vynikajícím materiálem pro ochranu proti gama záření. [28]

Míra, do jaké původní intenzita záření projde skrz těleso, závisí na konkrétním materiálu a tloušťce vrstvy, kterou paprsek prochází. Tato závislost absorpce materiálu je popsána takzvaným absorpčním zákonem:

$$I = I_0 \exp(-\mu d).$$

(1)

I je prošlá intenzita záření, I_0 je původní intenzita záření, μ je lineární absorpční koeficient, závisí na materiálu, ze kterého je předmět vyroben, a d je tloušťka materiálu. Z absorpčního zákona plyne, že pokud budeme mít předmět s vysokým lineárním absorpčním koeficientem μ a dostatečnou tloušťkou, nepodaří se nám jej prosvítit ani silným zdrojem záření. Tohoto jevu se využívá při stínění záření olovem, které má vysokou hodnotu lineárního absorpčního koeficientu. 1 cm olova dokáže zredukovat gama záření o 50 %.[17]

2.1.1 Havárie vrtulníku

V této části prvotních havarijních opatření, lze rozporovat další nepřesnost v seriálu oproti skutečnosti, a tím je havárie vrtulníku.

Při zasypávání reaktoru za pomoci vrtulníků dochází k situaci, kdy se jeden z vrtulníků nedodrží bezpečný odstup, dostane se do kuželu stoupajícího kouře přímo nad reaktorem a následně naráží do stavebního jeřábu stojícího nedaleko, který způsobí jeho zřícení (obr. 13). [21]



Obrázek 13: Havárie vrtulníku. [21]

Ve skutečnosti se havárie vrtulníku neodehrála v prvních dnech při pokusech o hašení reaktoru, ale až později v říjnu roku 1986 při dopravě materiálu na stavbu černobylského sarkofágu. Jeden z vrtulníků při dopravě materiálu zavadil o lana stavebního jeřábu a havaroval. [20]

2.2 Velikost druhotné parní exploze

Ve druhém díle série přijíždí do oblasti Černobylu za Valerijem Legasovem a Borisem Ščerbinou Uljana Chomjuková, hlavní fyzička běloruského institutu jaderné energie. Přináší zprávu, ze které vyplývá, že směs, kterou zasypávají reaktor požár uhasí, ale teplota jádra zase stoupne a dojde k protavení přes spodní vrstvu betonu pod reaktorem. Na to jí Valerij Legasov odvětí, že o tomto problému samozřejmě ví, ale že k protavení dojde přibližně až za další měsíc. S tím Chomjuková souhlasí, ale upozorní ho na jiný problém, jímž je protavení paliva biologickým krytem zhruba do dvou dnů. Dále hrozí zasažení rezervních nádrží s vodou. Valerij Legasov jí sděluje informaci potvrzenou od personálu elektrárny, že nádrže s vodou jsou téměř prázdné, proto není důvod k obavám. Chomjuková však tvrdí že vlivem výbuchu došlo k protržení okolních potrubních systémů s vodou a tato voda tak znovu plní rezervní nádrže, společně s vodou z hasičských aut. Valerij Legasov tak dochází k přesvědčení, že nádrže jsou opět plné. Chomjuková, Legasov a Ščerbina se účastní srazu vládní komise, která byla vytvořena v zájmu odstranění následků havárie. Spolu s dalšími se této komise účastní i generální tajemník SSSR Michail Gorbačov. Při tomto setkání prezentuje Valerij Legasov hrozbu vzniku žhavé lávy, která vznikne roztavením směsi písku shazovaného k uhašení reaktoru. Láva se poté začne protavovat, a jak tvrdí Chomjuková, zasáhne i rezervní nádrže plné vody. Což bude mít za následek obrovskou termální explozi o síle 2 až 4 megatun.

Přičemž tato exploze by měla za následek naprostého zničení všeho v okruhu 30 kilometrů včetně 3 dalších jaderných reaktorů v Černobylu. Dále hrozí rozptýlení tohoto radioaktivního materiálu a zamoření oblasti v okruhu 200 kilometrů, a obrovský únik radiace, který by zasáhl Ukrajinu, Litvu, Lotyšsko, Bělorusko, Polsko, Československo, Maďarsko, Rumunsko a větší část NDR. [21]

S ohledem na další zdroj, ve kterém je uvedeno, že na dně reaktoru se vyskytuje magma ze 195 tun jaderného paliva. Tudíž hrozí protavení hořícího paliva skrz betonovou desku pod reaktorem. Pokud by se pouhých 1400 kg směsi uranu a grafitu setkala s vodou, která se nahromadila při hašení pod betonovou deskou, poté by hrozila druhá ještě ničivější exploze. Podle expertů by se jednalo o explozi o síle 3 až 5 megatun.

Ilustrativní explozi můžeme pozorovat na obrázku 14. [20]



Obrázek 14: Druhotná exploze. [21]

Z fyzikálního hlediska se v tomto případě jedná o největší nepřesnost, kterou nám seriál nabízí. Detailní rozbor možné druhotné exploze je popsán následujícími odrážkami.

- Výbuch 1 tuny TNT odpovídá uvolněné energii 4,184 GJ.
- Výbuch 1 Mt odpovídá tedy cca 4 PJ uvolněné energie.
- Reaktor s elektrickým výkonem 1 GW má tepelný výkon cca 3,2 GW \Rightarrow vyrobí cca 8 PJ za měsíc.
- Výbuch 2 – 4 Mt TNT odpovídá tepelnému výkonu, který reaktor při plném výkonu vyprodukuje za 1,5 – 2 měsíce.
- \Rightarrow je fyzikálně nemožné, aby roztavené palivo obsahovalo tolik tepla, kolik fungující reaktor při plném výkonu vyprodukuje za 1,5 – 2 měsíce.

Apokalyptická druhotná exploze, tak jak je popsána v seriálu, byla asi nejvýraznějším odklonem od reality. Nicméně hrozba výbuchu existovala. I když by výbuch nedosahoval takových rozměrů, šlo stále o vážnou hrozbu. K rezervním nádržím pod reaktorem se tedy vydávají tři potápěči z řad zaměstnanců elektrárny. Jejich úkolem je, za

pomocí ručního ovládní v těchto nádržích, vypustit jejich obsah. Po úspěšném splnění tohoto úkolu, byla hrozba druhotné exploze eliminována. [21]

Nyní ale hrozí protavení magmatu betonovou podlahou pod reaktorem, vypuštěnými nádržemi a následné kontaminování půdy a podzemních vod pod reaktorem. Z toho důvodu jsou povoláni horníci. Jejich úkolem je vyhloubení tunelu vedoucího od třetího bloku reaktoru ke čtvrtému (obr. 15) a pod ním pak vyhloubit prostor pro chladicí zařízení na bázi kapalného dusíku, které mělo zastávat dvě funkce. První měla být ochlazení reaktoru. Druhou funkcí mělo být zmražení půdy pod reaktorem, aby bylo zamezeno proniknutí magmatu půdou a následné kontaminování spodních vod. [21]



Obrázek 15: Tunel pod reaktorem. [23]

Proč kapalný dusík?

Kapalný dusík má stejné chemické složení jako plynný dusík, který se nachází ve vzduchu. Je to kapalina s hustotou o něco menší než voda, 1 ml kapalného dusíku váží přibližně 0,81 g, zatímco 1 ml vody váží 1,00 g. Kapalný dusík je však mnohem chladnější. Při atmosférickém tlaku se začne vařit již při teplotě $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, což odpovídá 77 K (kelvinů). Proto se využívá jako velmi účinné chladicí médium a bylo odpovídající volbou pro úkol chlazení reaktoru a zmražení půdy. [29]

Seriál se nakonec nevěnuje finálnímu dořešení hrozby z protavení. Z ostatní zdrojů ale víme, že kapalný dusík nebyl nakonec vůbec použit. Důvodem může být finanční náročnost tohoto řešení, nedostatek potřebného množství kapalného dusíku, nebo také změna situace, kdy využití kapalného dusíku už pozbývalo smyslu. Víme, že vyhloubený prostor pod reaktorem byl nakonec vylit betonem, což nakonec bylo shledáno dostatečným opatřením proti protavení. [25]

2.2.1 Sloní noha

Korium, smrtelná směs jaderného paliva, regulačních tyčí, roztaveného betonu, písku, hlíny a olova, tvoří ve spodních patrech černobylské elektrárny bizarní útvary připomínající zamrzlé vodopády a pokroucené stalaktity, které se táhnou z rezavých šachet a parních ventilů. Právě to bylo jednoznačným potvrzením hrozby z protavení. Nejslavnější z těchto útvarů, známý jako Sloní noha (obr. 16), byl objeven likvidátory osm měsíců po havárii v místnosti 217/2, asi dva metry pod zničeným reaktorem a zhruba šest metrů nad úrovní země. Radiace zde dosahovala intenzity osm až deset tisíc rentgenů za hodinu, což znamenalo, že pouhých pět minut v této místnosti by bylo pro dospělého člověka smrtelných. [25]



Obrázek 16: Sloní noha. [25]

2.3 Odstranění radioaktivních trosk ze střechy 3. bloku

Další překážkou bránící úspěšnému odstranění následků havárie a také zakrytí reaktoru jsou úlomky grafitu rozeté po střechě budovy. Valerij Legasov rozdělí střechu do tří oblastí (Káťa, Nina, Máša) podle úrovně radioaktivity. V oblasti Káťa je záření o hodnotě 1000 rentgenů za hodinu, dvě hodiny pobytu v této oblasti jsou smrtelné. V oblasti Nina je záření o hodnotě 2000 rentgenů za hodinu, jedna hodina pobytu v této oblasti je smrtelná. V poslední třetí oblasti nazývané Máša je úroveň záření o hodnotě 12000 rentgenů za hodinu, pobyt delší než jsou tři minuty v této oblasti je smrtelný, dle předpokladu zde nebudou fungovat ani přístroje. Valerij Legasov rezolutně odmítá využití lidí pro odstranění grafitu ze střechy a navrhuje využití lunochodů, primárně určených pro vesmírný program. Lunochody odklízí grafit z prvních dvou oblastí, ale ze třetí Máši s nejvyšším stupněm záření se jim to nedaří. SSSR nakonec vyjedná zapůjčení robota z NSR. Vlivem klamných informací, uváděných oficiálně SSSR o úrovni záření, ale robot nemá šanci na úspěch a v oblasti přestává fungovat. [21]

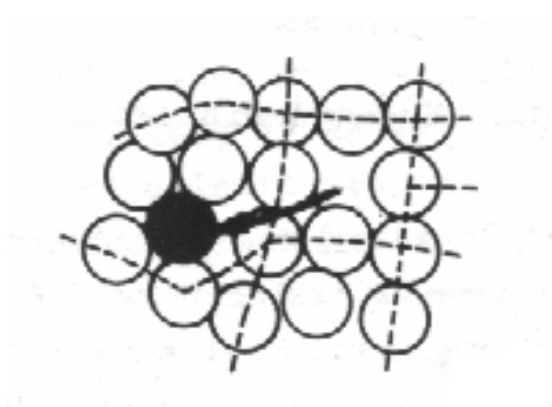
Vliv záření na polovodičové součástky a integrované obvody

Vystavení součástek záření vede k dočasným nebo trvalým změnám jejich vlastností, což ovlivňuje nejen funkci jednotlivých součástek, ale i celého obvodu. Citlivost na záření závisí na typu záření a velikosti dávky. [13]

Ionizace je proces, při kterém se z neutrálního atomu vytvoří iont tím, že se odebere nebo přidá elektron. V kovalentních polovodičích tento proces vytváří volné nosiče náboje, jako jsou elektrony a díry, což vede k přechodným změnám některých fyzikálních vlastností, zejména ke zvýšení vodivosti.

Tvorbou nečistot rozumíme přetvoření jader, tedy změnění chemické podstaty a tím i vlastností materiálu. [13]

Pružné srážky mezi částicí a jádrem atomu mohou být zprostředkovány elektromagnetickými i jadernými silami. Při dostatečné energii částic dojde k vyražení jádra atomu z řádné polohy v krystalické mřížce do polohy intersticiální. Taková porucha se nazývá Frenkelova bodová porucha (obr. 17). [13]



Obrázek 17: Frenkelova bodová porucha. [13]

Takové srážky se v materiálu projevují tvorbou stavů v zakázaném pásu, které usnadňují přechod elektronu z valenčního do vodivostního pásu. To má za příčinu zvýšení proudu v závěrném směru PN přechodu a v propustném směru usnadňují tyto stavy rekombinaci. Dochází také ke změně hustoty dopování materiálu a k tvorbě stavů v blízkosti hranice dvou pásů, které usnadňují zachycování náboje. [13]

V interakcích v polovodičovém materiálu se procesy odehrávají na krátké vzdálenosti, což způsobuje, že veškerá ztráta energie probíhá v omezené oblasti. Částice, které nemají dostatek energie na ionizaci dalších částic, přeměňují zbývající energii na teplo. To má za následek výrazné zahřátí lokální oblasti a následné lokální roztavení a zase ochlazení materiálu. Tento jev vytváří oblasti poruch nazývané *teplotní klíny*. [13]

U integrovaných obvodů jsou účinky záření, které mohou ovlivnit jejich provoz a funkci, obzvláště patrné. Tyto účinky, známé jako SEE, jsou způsobeny jedinou energetickou částicí, která může mít buď nedeštruktivní, nebo deštruktivní vliv na zařízení. Nedeštruktivní účinky, označované jako SEU, způsobují softwarové chyby, jako jsou

změny stavů v logických obvodech nebo změny stavu paměťových buněk, které lze opravit resetem obvodu. Destruktivní chyby, známé jako SEL, vedou ke zvýšení proudu nad kapacitu zařízení a vyžadují okamžitý reset napájení. Mezi další možné následky na integrovaných obvodech patří vyhoření výkonových MOSFETů, poškození hradel, zamrznutí bitů, vznik šumu a další problémy. [13]

2.3.1 Bioroboti

Z důvodu nefunkčnosti robotů přichází v úvahu jediné řešení, a to využití lidské síly pro odstranění zbylých úlomků grafitu. Varianta, která byla zprvu odmítána, je teď jediným řešením. Do boje s odstraněním radioaktivních úlomků ze střechy třetího reaktoru tedy vstupují lidé, kteří byli označováni jako likvidátoři. V tento moment dochází k další nepřesnosti. V seriálu označuje Valerij Legasov tyto lidi jako "bioroboty" (obr. 18). V době odklizení následků havárie byli tito lidé označováni jako likvidátoři, nikoliv bioroboti. Výraz bioroboti se začal používat až po skončení prací na odstranění havárie. [21]



Obrázek 18: Bioroboti. [21]

2.4 Vliv ozáření na lidský organismus

2.4.1 Radiační popálení jednoho z hasičů

Při hašení požáru reaktoru krátce po výbuchu, bere jeden z hasičů do rukou grafitový úlomek z reaktoru a prakticky v zápětí po této situaci se u něj projevují příznaky akutního poškození kůže vlivem ozáření (obr. 19). [21]

Deskvamativní dermatitis se objevuje během několika hodin po ozáření, nejpozději do dvou dnů, a poté mizí. Při vyšších dávkách se erytém může objevit opakovaně. La-

tentní doba před rozvojem plných příznaků bývá 2 – 3 týdny. V této fázi se zánětlivý exsudát (zánětlivý extravaskulární výpotek) hromadí v poškozené vrstvě bazálních buněk, což vede k tvorbě puchýřů a mokvajících ploch. V příznivějších případech dochází po dalších 2 – 3 týdnech k obnově pokožky z okrajů poškození a z přežívajících kmenových buněk ve vlasových folikulech. [12]



Obrázek 19: Popálený hasič. [21]

2.4.2 Smrt přihlížejících lidí na mostě

V prvním díle série, krátce po výbuchu je záběr na skupinu několika lidí stojících na železničním mostě (obr. 20) a sledující barevnou záři ionizujícího vzduchu stoupající z vybuchlého reaktoru. Posléze se nad tyto lidi dostává oblak kouře a popela z havarovaného reaktoru. Na záběrech je patrné zasažení těchto lidí spadem popela. V následujícím díle série je krátký záběr, na tyto lidi čekající na chodbě v nemocnici v Pripjati se zjevným popálením, vlivem radioaktivního záření. V seriálu je zmíněno, že z těch lidí, kteří sledovali havárii z tohoto mostu nikdo nepřežil. [21]

Silnice vedoucí přes železnici spojuje vesnici Kopachi s městem Pripjat. Město Černobyl leží přibližně 10 kilometrů od tohoto mostu. Nejbližší sídlo je Pripjat. Je to v podstatě vstupní brána do města. Vzdálenost mezi mostem a černobylskou elektrárnou činí několik kilometrů. Havárie se stala v 1:23 ráno, kdy město ještě spalo. Výbuch nezpůsobil žádné zničené budovy ani rozbitá okna. Pouze zaměstnanci elektrárny, hasiči a jejich rodiny věděli, že se něco stalo, zatímco zbytek obyvatelstva si ničeho nevšiml až do rána. Nikdo v noci ani během dne na most nepřišel. Tudíž neexistuje odpověď na otázku, kolik lidí na Mostě smrti zemřelo. Měření radiace ve městě začalo brzy ráno. Bylo známo, že most je vysoce radioaktivní, proto byly na obou jeho stranách rozmístěny policejní hlídky. Přes most projížděla jen vozidla, ale pěší vstup byl zakázán. Jedním důvodem, proč můžeme most nazývat Mostem smrti, je evakuace obyvatel Pripjati. Více než 1 000 autobusů převezlo evakuované přes most, ale přejezd přes Černobylský

Most smrti trvá méně než minutu, což nestačí k tomu, aby někdo utrpěl smrtelné následky. [25]



Obrázek 20: Lidé na železničním mostě.

2.4.3 Kontaminování dalších lidí stykem s ozářenými pacienty

V seriálu je také vyobrazen osud hasiče Vasilije Ignatěnka a jeho manželky. Vasilij Ignatěnko je hasičem v černobylské jaderné elektrárně, který se se svou jednotou jako první dostává na místo požáru vybuchlého reaktoru. Záhy se na něm projevují příznaky radioaktivního ozáření. Nejprve je dopraven do Nemocnice v Pripjati a následně je převezen vrtulníkem do 6. nemocnice v Moskvě. Jeho manželka Ludmila Ignatěnková ho v nemocnici navštěvuje. Po odeznění prvotních příznaků nemoci z ozáření a překlenutí doby latence, se naplno projevují devastující účinky velkého množství záření, kterému byl Vasilij Ignatěnko vystaven. V tomto stádiu je kolem jeho lůžka postaven igelitový stan. Při jedné z návštěv, kdy se Ludmila dostane i přes zákaz do igelitového stanu ke svému manželovi, a sděluje mu, že je s ním těhotná, ji zahlédne Uljana Chomjuková, která zde zrovna provádí výslech Aleksandra Akimova. Chomjuková tedy ihned odvádí Ludmilu Ignatěnkovou pryč od svého manžela, protože pozná že je Ludmila těhotná a bojí se, jaké fatální následky to může mít pro její nenarozené dítě (obr. 21). [21]

Ve skutečnosti ale igelitové stany sloužili na ochranu ozářených pacientů. Molekulární změny v klíčových biologických látkách, jako jsou DNA, enzymy a proteiny, mohou způsobit funkční a strukturální změny v buňkách, orgánech i v celém organismu. Ozářený pacient trpí chronickým nedostatkem bílkovin. Nedostatek bílkovin snižuje jeho obranyschopnost a má vliv na imunitní systém. V seriálu se tedy vyskytuje tato nepřesnost o ochraně lidí před ozářením stykem s pacienty. Těhotná Ludmila Ignatěnková nakonec po čase o své dítě přichází, ale nelze tvrdit, že se tak stalo vlivem kontaktu s jejím nemocným manželem v nemocnici. [13]



Obrázek 21: Manželé Ignatěnkovi a Uljana Chomjuková v nemocnici. [21]

Diskuze

Tato kapitola slouží k podrobnému rozboru zvolených rozporů mezi seriálem a skutečností. Nejprve je daný problém popsán, jak je vyobrazen v seriálu a poté realita události. Součástí je také objektivní zhodnocení autorem práce, jaký vliv má daný rozpor na celkové hodnocení seriálu.

Jako první případ bude diskutována snaha zamezení šíření kouře popela a záření z havarovaného reaktoru. V seriálu je uvedeno, že na reaktor bude sypána směs písku a bóru. Písek je vhodným materiálem pro svou vysokou teplotu tání a bór ne spíše kyselina boritá velmi dobře absorbuje neutrony, proto se také přidává do vody primárního okruhu elektrárny, kde napomáhá regulaci štěpné reakce. V seriálu jsou tedy uvedeny pouze tyto dvě suroviny. Z jiných zdrojů se ale dozvídáme o dalších materiálech, které byly na reaktor shazovány. Konkrétně se jedná o Jíl a olovo. Jíl obsahuje křemen stejně jako písek, tudíž jeho využití bylo ze stejného principu, jako využití písku. Olovo však díky své vysoké měrné hustotě $11\,340\text{ kg/m}^3$, je vynikajícím materiálem pro ochranu proti šíření gama záření. Můžeme se jenom domnívat, proč si autoři seriálu vybrali jenom zmínku o písku a bóru. Dle mého názoru to souviselo s tím, že v té době hrozilo více nebezpečí a v seriálu jednoduše nebyl prostor podrobněji vysvětlovat tuto problematiku. Nicméně pro účel využití seriálu jako výukového materiálu by bylo žádoucí tyto skutečnosti doplnit.

Druhý rozpor mezi seriálem a skutečností přímo souvisí se zasypáváním reaktoru. Seriál nám ukazuje havárii vrtulníku, který se při zasypávání reaktoru zaplete do lan vedle stojícího jeřábu a zřítí se k zemi. Skutečnost je ale jiná. K havárii vrtulníku nad elektrárnou skutečně došlo, ale ne při zasypávání reaktoru, nýbrž asi o půl roku později při dopravě materiálu na stavbu sarkofágu. Dle mého názoru chtěli autoři havárii vrtulníku do seriálu nějak implementovat a jelikož se jeho děj nevěnuje stavbě sarkofágu, využili k tomu okamžik, kdy dochází k zasypávání odkrytého jádra. Jedná se tedy o faktickou nepřesnost, která je v rozporu s realitou, ale dle mého názoru nijak závažně nenarušuje důležité momenty v seriálu.

Za nejvážnější odklon od reality lze považovat hrozbu druhotné parní exploze. V seriálu je správně uvedeno, že nádrže pod reaktorem opravdu obsahují vodu a kdyby došlo k protavení koria skrz betonovou podlahu reaktoru, k výbuchu by jistě došlo. Nicméně výbuch by nebyl dozajista tak silný, jak je v seriálu uvedeno. Hovoří se tam o výbuchu o síle asi 2 – 4 Mt TNT. Deduktivní metodou můžeme toto číslo prezentované seriálem lehce napadnout. Výbuch 1t TNT odpovídá uvolněné energii 4,184 GJ. Výbuch 1 Mt odpovídá tedy 4 PJ uvolněné energie. Černobylský reaktor měl tepelný výkon 3,2 GW \Rightarrow vyrobí cca 8 PJ za měsíc. Výbuch 2 – 4 Mt TNT odpovídá tepelnému výkonu, který reaktor při plném výkonu vyprodukuje za 1,5 – 2 měsíce. Je fyzikálně nemožné, aby roztavené palivo obsahovalo tolik tepla, kolik fungující reaktor při plném výkonu vyprodukuje za 1,5 – 2 měsíce. Navíc už jsme si uvedli skutečnost o shazování písku s bórem do reaktoru, takže možná štěpná reakce byla narušena i touto skutečností. Jaderná katastrofa takových rozměrů, jako prezentuje seriál tedy přijít nemohla. Výbuch

ale reálně hrozil až do té chvíle, než došlo k vypuštění nádrží. I když můžeme uvažovat o této hrozbě, jako o největší lži, kterou nám seriál nabízí. Realita byla taková, že hrozba výbuchu opravdu existovala. S největší pravděpodobností by se jednalo o daleko slabší výbuch. Škody by ale napáchalo i opětovné obnažení reaktoru a únik záření do ovzduší. Proto i když se jedná o značný rozdíl ve velikosti exploze, tvůrci se drželi pravdy, protože k explozi mohlo reálně dojít. Pro možné edukativní účely je ale na místě rozporovat velikost exploze.

Hrozba protavení v sobě nenesla jenom nebezpečí druhotného výbuchu, ale po tom, co byla vypuštěna voda z rezervních nádrží, hrozilo i protavení do těchto bazénů a dále betonem až do půdy a následné kontaminování spodních vod. Jak víme, Černobylská elektrárna leží nedaleko řeky Pripjať a hrozilo by tak kontaminování řeky a všech následných toků. Z toho důvodu byli na místo vysláni horníci, jejichž úkolem bylo vyhloubení tunelu od reaktoru 3. bloku pod havarovaný čtvrtý reaktor. Zde měli vytvořit dostatečný prostor pro chladicí zařízení na bázi kapalného dusíku, jímž by se dalo ochlazovat protavené korium a případně i zmrazit půdu pod reaktorem, aby nedošlo proniknutí korium její vrstvou. Tento postup je shodně popsán jak v seriálu, tak v ostatních zdrojích. Nicméně seriál už neukazuje dořešení této problematiky. Začíná se věnovat jiné hrozbě a k této už se nevrací. Proto považuji za nutné uvedení této skutečnosti pro úplné vysvětlení. V ostatních zdrojích je dohledatelné, že nakonec zařízení s kapalným dusíkem nebylo vůbec použito. Bylo zvoleno řešení, kdy byla vyhloubená šachta pod reaktorem zalita betonem, a tak došlo k vyztužení oblasti pod reaktorem, což bylo považováno za dostatečnou ochranu. To že tomu tak opravdu bylo nám potvrzuje i útvar tzv. sloní nohy. Jedná se o korium protavené skrz betonovou podlahu reaktoru, které se zastavilo pouhých 6 metrů nad úrovní země. Radiace zde dosahovala intenzity osm až deset tisíc rentgenů za hodinu, což znamenalo, že pouhých pět minut v této místnosti by bylo pro dospělého člověka smrtelných. Postupem času došlo ale k významnému ochlazení tohoto útvaru, a tak přestal být bezprostřední hrozbou. Tím se dle mého názoru potvrdilo i rozhodnutí nevyužití kapalného dusíku na ochlazování reaktoru, protože vyztužení betonem bylo dostačující.

Onou hrozbou, díky které nedošlo v seriálu k dovysvětlení budování tunelu byly vysoce radioaktivní úlomky grafitu z reaktoru, jež byly výbuchem vymrštny na střechu 3. bloku. Pro jejich odstranění je rozhodnuto využít lunární vozítka, protože pro člověka by byl vstup na střechu moc velkým rizikem. Tento postup je shodně uveden v seriálu i v ostatních zdrojích. Přichází ale chvíle, kdy už je radiace tak velká, že jejím vlivem dochází k tavení polovodičových součástí a dalším poruchám u integrovaných obvodů robotů a přestávají fungovat. Proto je jedinou možností využití lidí pro odstranění trosk ze střechy. Zde se objevuje rozpor mezi seriálem a realitou. Valerij Legasov je v seriálu označujeme jako "bioroboty". Ve skutečnosti je však nikdo takto neoznačoval. Byli známí jako "likvidátoři". Vliv tohoto rozporu na faktické události, které jinak zcela korespondují s realitou, je zanedbatelný. Nicméně pro mě, jako studenta technické výchovy, je to šance, jak se přes tento drobný rozpor propracovat k popisu důvodů nefunkčnosti robotů a podrobněji je rozebrat.

Radiační popálení jednoho z hasičů je prvním rozporem ze společné kapitoly vlivu ozáření na lidský organismus. V seriálu můžeme pozorovat že při hašení požáru reaktoru krátce po výbuchu, bere jeden z hasičů do rukou grafitový úlomek z reaktoru a prakticky okamžitě po této situaci se u něj projevují příznaky akutního poškození kůže vlivem ozáření. Příznaky ozáření mají ve skutečnosti odlišný průběh. Deskvamativní dermatitis vzniká po ozáření vyššími dávkami, projevuje se nevýrazným časným erytémem, který se objevuje během několika hodin po ozáření, nejpozději do dvou dnů, a poté mizí. Při vyšších dávkách se erytém může objevit opakovaně. Latentní doba před rozvojem plných příznaků bývá 2 – 3 týdny. V této fázi se zánětlivý exsudát (zánětlivý extravaskulární výpotek) hromadí v poškozené vrstvě bazálních buněk, což vede k tvorbě puchýřů a mokvajících ploch. Jedná se o faktický rozpor s realitou a dovedu si představit, že ho autoři zařadili do seriálu z důvodu podpoření vážnosti této tragédie. Svou povahou to není ale zásadní pochybení, které by mělo mít vliv na celkový pohled na seriál.

Velice podobným případem je údajná smrt všech lidí, kteří sledovali havárii z železničního mostu. V seriálu je patrné zasažení těchto lidí radioaktivním mrakem a v závěrečném díle je zmínka o tom, že nikdo z lidí, kteří na mostě v osudnou noc stáli, nepřežil. S určitostí můžeme tvrdit pouze toto. Podle měření, které proběhlo ráno po havárii, bylo známo, že most je vysoce radioaktivní, proto byly na obou jeho stranách rozmístěny policejní hlídky. Přes most projížděla jen vozidla, ale pěší vstup byl zakázán. Havárie se stala brzy ráno, kdy většina lidí spala. Není známo, že by někdo havárii z mostu sledoval. Jediným důvodem, proč můžeme most nazývat Mostem smrti, je evakuace obyvatel Pripjati. Více než 1 000 autobusů převezlo evakuované přes most, ale přejezd přes Černobylský Most smrti trvá méně než minutu, což nestačí k tomu, aby někdo utrpěl smrtelné následky. Dle mého názoru autoři seriálu využili známého faktu o vysoké radioaktivitě mostu. A se sledováním stejných zájmů jako v případě popálení hasiče, se rozhodli dokreslit vážnost černobylské havárie. Stejně jako v předchozích případech je vhodné na tento rozpor upozornit, ale celkový pohled na seriál nemůže nijak vážněji narušit.

Přítomnost igelitových stanů pro pacienty trpící nemocí z akutního ozáření není nijak zvláště v seriálu vysvětlena. Ale ze scény v nemocnici, kde se nachází Ludmila Ignatěnková uvnitř tohoto stanu se svým nemocným manželem a náhodou je zahlédne Uljana Chomjuková, která ji ihned odvádí pryč od jejího manžela, seriál nabádá diváka, aby si myslel, že bezprostřední nebezpečí hrozí vstupem do stanu Ignatěnkové, nikoliv však jejímu manželovi. Opak je však pravdou. Ve skutečnosti igelitové stany sloužili na ochranu ozářených pacientů. Ozářený pacient trpí chronickým nedostatkem bílkovin. Nedostatek bílkovin snižuje jeho obranyschopnost a má vliv na imunitní systém. Tento rozpor má určitě právo na to být v práci zaznamenán, ale jeho význam co se týče dějové linie důležitých událostí, není dle mého názoru tak významný.

Závěr

Tato závěrečná práce byla zaměřena na porovnání pětidílné filmové série od HBO Černobyl s realitou. Tu v této práci reprezentovalo několik relevantních zdrojů literatury a tato práce se o ně z velké části opírá. Celkem bylo v seriálu objeveno deset rozporů s realitou. Ty se dále rozdělili do menších bloků, které, které na sebe navazovaly, nebo spolu přímo souvisely.

Z popisu událostí, tak je byly prezentovány v seriálu a následného porovnání s realitou vznikla diskuse o relevantnosti těchto rozporů v seriálu. Z toho vychází i závěrečná otázka, zda chyby nalezené v seriálu, měly vážný vliv na kvalitu vyobrazení všech událostí.

Je důležité připomenout, že se v první řadě jedná o komerční seriál, který měl tedy plnit jiný cíl než edukativní. Nicméně autorské zpracování je tak kvalitní, že lze opravdu racionálně tvrdit, že informace obsažené v tomto seriálu by mohly sloužit i k edukativním účelům. To slouží zároveň jako odpověď na otázku, zda by byl seriál vhodný k edukativním účelům. Pokud by došlo k doplnění informací, které byly v této práci rozporovány, nic nebrání využití seriálu ve školství.

Tato práce tímto neplní pouze cíl vědecké práce, co nejpřesněji popsat vybrané rozpory, ale zároveň může být pomocným aparátem pro všechny kdo chtějí Seriál využít k edukativním účelům.

Referenční seznam literatury

- [1] Jak vznikla jaderná elektrárna: Vůbec první reaktor byl otevřen v SSSR. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.epet.cz/jak-vznikla-jaderna-elektrarna-vubec-prvni-reaktor-byl-otevren-v-sssr/>. [cit. 2024-05-04].
- [2] Statistika z jaderných elektráren. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/statistiky-z-jadernych-elektraren>. [cit. 2024-05-04].
- [3] Radioaktivita. Online. 2013. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>. [cit. 2024-05-04].
- [4] Základní pojmy. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/zakladni-pojmy>. [cit. 2024-05-04].
- [5] Ionizující záření a jeho vztah k živému organismu. Online. 2006. Dostupné z: <http://www.mediprofi.cz/ionizujici-zareni-organismusuniqueidgOkE4NvrWuMf0y8FDgMuk6qLYsX2a233/>. [cit. 2024-05-04].
- [6] Jaderná a radiační fyzika, Biologické účinky ionizujícího záření. Online. 2006. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>. [cit. 2024-05-04].
- [7] Jaderná fyzika a ionizující záření, Radiační ochrana ionizujícího záření. Online. 2005. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>. [cit. 2024-05-04].
- [8] KONEČNÝ, J. Radiační fyzika. Skripta JČU. České Budějovice, 2007. ISBN 80-7040-846-X.
- [9] Radiační ochrana, Biologické účinky ionizujícího záření. Online. 2000. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana>. [cit. 2024-05-04].
- [10] Stručný přehled biologických účinků záření. Online. 2002. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/strucnyprehled-biologickych-ucinku-zareni/>. [cit. 2024-05-04].
- [11] Biologické účinky ionizujícího záření. Online. 2003. Dostupné z: http://radiace.czweb.org/ucinky_zareni.html. [cit. 2024-05-04].
- [12] ZÖLZER, F; KUNA, P a NAVRÁTIL, L. Mechanismy účinků ionizujícího záření. ZSF JČU, 2006.
- [13] ÖSTERREICHER, J a VÁVROVÁ, J. Přednášky z radiobiologie. Hradec Králové. Ústav radiobiologie a imunologie, Vojenská lékařská akademie J. E., 2003. ISBN 80-86571-01-7.

- [14] ŠAVEL, Josef. Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice. 4., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN ISBN978-80-7300-190-2
- [15] BEZDĚK, M. Elektronika I. Třetí vydání. České Budějovice: KOPP, 2008. ISBN ISBN 978-80-7232-365-4
- [16] PN přechod bez a s připojeným napětím. Online. 2006. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/10-prechod-pn-druhy-vodivosti-materialy-pro-polovodice/>. [cit. 2024-05-04].
- [17] ŠEDA, J. Dozimetrie ionizujícího záření. Praha: SNTL, 1983.
- [18] MOULD, Richard F. Chernobyl Record: The Definite History of The Chernobyl Catastrophe. Philadelphia: IOP Publishing, 2000. ISBN ISBN 0-7503-0670-X.
- [19] Atomová elektrárna Černobyl. Online. 2005. Dostupné z: <https://www.pavrda.cz/chernobyl/poloha.html>. [cit. 2024-05-04].
- [20] PLOKHY, Serhii. Chernobyl. History of a Tragedy, 2018. Jota, 2019. ISBN 978-80-756-5462-5.
- [21] RENCK, Johan. Černobyl (seriál). Online. HBO, 2019.
- [22] VARGO, George J. The Chornobyl Accident: A Comprehensive Risk Assessment. Battelle Press, 2000. ISBN ISBN 1-57477-082-9.
- [23] Jaderná elektrárna Černobyl. Online. 2011. Dostupné z: <https://jaderneinfo.webnode.cz/news/schema-principu-elektrarny/>. [cit. 2024-05-04].
- [24] Černobylská havárie a její průběh. Online. 2005. Dostupné z: <https://chernobylzone.cz/chernobylsky-experiment-a-prubeh-havarie/>. [cit. 2024-05-04].
- [25] JOHNSON, Thomas. Bitva o Černobyl (dokument). 2006.
- [26] Kyselina boritá. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kyselina_borit%C3%A1. [cit. 2024-07-04].
- [27] Jíl. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/J%C3%ADl>. [cit. 2024-07-04].
- [28] Olovo. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Olovo>. [cit. 2024-07-04].

[29] Kapalný dusík. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kapaln%C3%BD_dus%C3%ADk. [cit. 2024-07-04].

