

UDK 621.311.25:621.039.534

Ventilacijski sistemi v nuklearnih elektrarnah

DAMIR PEČORNIK

Naloge ventilacijskih sistemov

Ventilacijski sistemi v nuklearnih elektrarnah so njihov integralni del in so posebno pomembni pri kontroli oddaje radioaktivnih nečistoč z odpadnim zrakom v okolico. V splošnem opravljajo hkrati več nalog:

- pri namenskem* pogonu nuklearne elektrarne skrbijo za odvod konvekcijske topote cevovodov in aparativ, zmanjšujejo koncentracijo radioaktivnih nečistoč v ozračju okoli reaktorja ter prečiščujejo odpadni zrak;

- pri nepravilnem pogonu elektrarne, posebno pri nepričakovanim izbruhi večjih količin radioaktivnih snovi zmanjšujejo posledice nesreče v okolici.

Poleg tega prezračujejo ventilacijski sistemi zaprte prostore, ustvarjajo želene klimatske razmere v različnih prostorih ter izplakujejo posamezna področja s čistim zrakom po okužtvah z radioaktivnimi nečistočami.

Pri projektiranju ventilacijskih sistemov v nuklearnih elektrarnah moramo zato upoštevati nekoliko pomembnih kriterijev.

Varnost elektrarne

Pri vseh vrstah pogona je varnost nuklearne in vseh za varnost odločilnih sistemov na prvem mestu. Za varnost pomembni sistemi ali komponente so deli nuklearne elektrarne, ki sodelujejo pri izključevanju reaktorja in ga držijo v izključenem stanju, nadalje oni, ki sodelujejo pri odvajjanju topote razpadnih elementov po izključitvi reaktorja, ali pa deli, katerih nepravilno delovanje bi povzročilo nedopustno oddajo radioaktivnih nečistoč v okolico, in končno deli, ki neposredno zadržujejo radioaktivne materiale.

Vsaka tudi največja mogoča nesreča (»NMN« = *MCA — Maximal Credibel Accident*), ne sme v nobenem primeru ogroziti okolice in okolišnjega prebivalstva. Zaradi tega so sistemi in komponente, ki sodelujejo pri obvladovanju vseh vrst nepravilnosti v pogonu, postavljeni dvakrat ali celo večkrat, ponavadi celo v različnih prostorih. Pri teh sistemih ali komponentah govorimo o *redundantnem*** postavljanju. Medtem ko se v ZDA zadovoljujejo pri njih z $2 \times 100\%$ ali $3 \times 50\%$ potrebnega učinka, se mora v Zvezni Republiki Nemčiji instalirati najmanj $3 \times 100\%$ ali $4 \times 50\%$. Pri tem uporabljajo naslednjo hipotezo (kriterij ene napake v sistemu): zaradi napake poljubne komponente varnostnega sistema se učinek zmanjša za $1 \times 100\%$.

* »Namenski pogon« je pogon, pri katerem nuklearna elektrarna — ustrezen svojemu namenu — napaja električno omrežje kljub manjšim napakam v sistemih, zaradi katerih izključitev nuklearnega reaktorja še ni potrebna.

** *redundo* (lat.) — imeti v izobilju.

ali $1 \times 50\%$; nadalje je ena od komponent redundantnega sistema lahko v reviziji, pa se učinek zmanjša torej za $2 \times 100\%$ ali $2 \times 50\%$; za izpeljavo naloge preostane nazadnje najmanj $1 \times 100\%$ ali $2 \times 50\%$ potrebnega učinka.

Razpoložljivost elektrarne

Ventilacijski sistemi pomenijo $1,8 \dots 2,2\%$ celotnih investicijskih stroškov nuklearne elektrarne. Relativno neznatni stroški pa žal ne dajejo prave slike o njihovi pomembnosti. Analiza posameznih funkcionalno vezanih kompleksov namreč zelo pogosto pokaže, da je pogon elektrarne v mnogočem odvisen od delovanja ventilacijskih sistemov.

Pri komercialnem pogonu nuklearne elektrarne pomeni izključitev iz napajalne mreže zaradi napake v ventilacijskem sistemu, ki sam ni nevaren, znatno denarno izgubo (saj dnevni bruto dohodek pri moči 600 MW znaša $0,01 \dots 0,015\%$ investicijskih stroškov).

Zaradi tega postavljamo tudi pri sistemih, ki sami niso nevarni, sodelujejo pa pri proizvodnji električne energije, zelo pogosto redundantne komponente, vendar se pri njih zadovoljujemo z $2 \times 100\%$ ali pa $3 \times 50\%$ potrebnega učinka.

Projektant ventilacijskih sistemov mora torej poznavati delovanje celotne elektrarne, da bi mogel prilagoditi sisteme skupnemu cilju: največji proizvodnji električne energije pri najmanjšem ogrožanju okolice.

Prečiščevanje ozračja v kontroliranem področju

Z radiološkega gledišča razlikujemo pri nuklearnih elektrarnah predvsem dve področji: potencialno radioaktivno področje in neaktivno področje. Navadno govorimo pri radiološko ogroženem delu elektrarne tudi o kontroliranem področju, ker kontroliramo v tem področju ne samo osebe pred in po bivanju v zaprtih prostorih, temveč tudi vse odpadne vode in zrak.

Pri današnjih elektrarnah z reaktorji na lahko vodo štejemo v kontrolno področje ponavadi stavbo reaktorja (*Reactor Building*) in stavbo s pomžnimi sistemmi (*Reactor Auxiliary Building*).

V teh prostorih so nameščeni sistemi, ki so posredno ali neposredno povezani s primarnim hladilnim sistemom, kar pomeni, da zaradi prepustnosti cevovodov in ventilov zasledimo v teh prostorih radioaktivne nečistoč v zraku. Poleg tega postajajo prah in sestavine zraka v neposredni bližini reaktorja zaradi obstreljevanja z nevroni tudi radioaktivni. V grobem razlikujemo v okuženem ozračju kontroliranega področja dve vrsti radioaktivnih nečistoč, in sicer: kontaminirani prah in kontaminirane pline. Medtem ko lahko trdne delce

(prah) izločamo brez večjih težav v absolutnih filterih, zadajajo radioaktivni plini marsikatero neprijetnost.

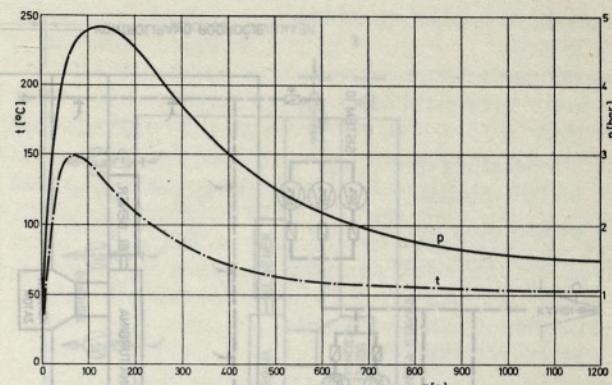
V kontroliranem področju vpihujemo čisti ali očiščeni zrak vedno v prostore s potencialno najnižjo radioaktivnostjo (ponavadi so to hodniki) ter ga vodimo postopoma do prostorov z najvišjo potencialno radioaktivnostjo, kjer tudi onesnaženi zrak odvajamo. Neredko uporabljamo v zaprtih prostorih z relativno visoko radioaktivnostjo dodatne recirkulacijske filtre.

Zaščita okolice elektrarne

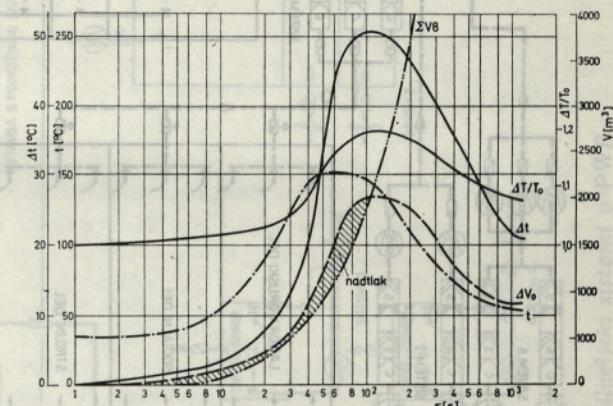
Z ventilacijskimi sistemi vzdržujemo v kontroliranem področju podtlak in tako preprečujemo nezaželeno oddajo radioaktivnih nečistoč v okolico. Ves odpadni zrak vodimo prek filterov do visokega kamina in odtok kontrolirano v okolico. Pri vrhu odzračevalnega kamina so merilni instrumenti za kontrolo oddaje radioaktivnih nečistoč. Zgornja emisijska količina je za vsako elektrarno strogo predpisana in je odvisna od naseljenosti okolice, klimatskih razmer, konfiguracije terena, vetrovnosti, tipa nuklearnega reaktorja in države. Dopustna radioaktivna količina, merjena ob ograji elektrarne, znaša približno 3...30 m rem/a*. Če upoštevamo, da dobi vsak človek letno iz vesolja, prek naravne radioaktivnosti materije v okolici ter pri zdravniških pregledih okrog 200...1000 m rem/a, tedaj si lahko približno predstavljamo, kako majhen del celotne letne količine prispevajo nuklearne elektrarne. K temu velja še pripomniti, da se z razdaljo od emisijske točke, v tem primeru od vrha kamina, specifična radioaktivna količina močno zmanjšuje.

Omenjene dopustne emisijske meje so računske vrednosti in slonijo na hipotetični prepustnosti primarnega hladilnega sistema. Dejanske vrednosti so približno stokrat manjše. To so pokazale številne meritve v ZDA, ZR Nemčiji in Franciji.

Celotna zaščita okolice od nezaželeno kontaminacije sloni namreč na načelu posode v posodi. Prva posoda je reaktor, druga je betonski prostor okoli reaktorja, tretja je notranja jeklena lupina zgradbe reaktorja (*Containment*) in četrta je betonska zunanjna lupina. Med obema lupinama je medprostor (*Anulus*). Medtem ko znaša pretlak v reaktorju 70...150 bar, je v vseh drugih posodah podtlak. Na ta način radioaktivne nečistoče ne morejo prodrieti nekontrolirano v okolico. Šele pri hipotetični nesreči primarnega hladilnega sistema (*LOCA — Loss of Coolent Accident*), ki je pri reaktorju na lahko vodo istoveten z največjo mogočo nesrečo (NMN), se tlak v drugi in tretji varnostni posodi zviša prek barometrskega. V tem



Sl. 1. Potelek tlaka in temperature v stavbi reaktorja pri NMN



Sl. 2. Potelek tlaka in temperature v medprostoru pri NMN

primeru bi dobili v jekleni lupini reaktorja zmes vodne pare in zraka pri tlaku približno 4,0...5,0 bar ter temperaturi 120...180 °C, kar je močno odvisno od tipa in moči reaktorja ter prostornine stavbe.

Slika 1 prikazuje potelek tlaka in temperature v zgradbi določenega modela reaktorja kot funkcije časa pri NMN.

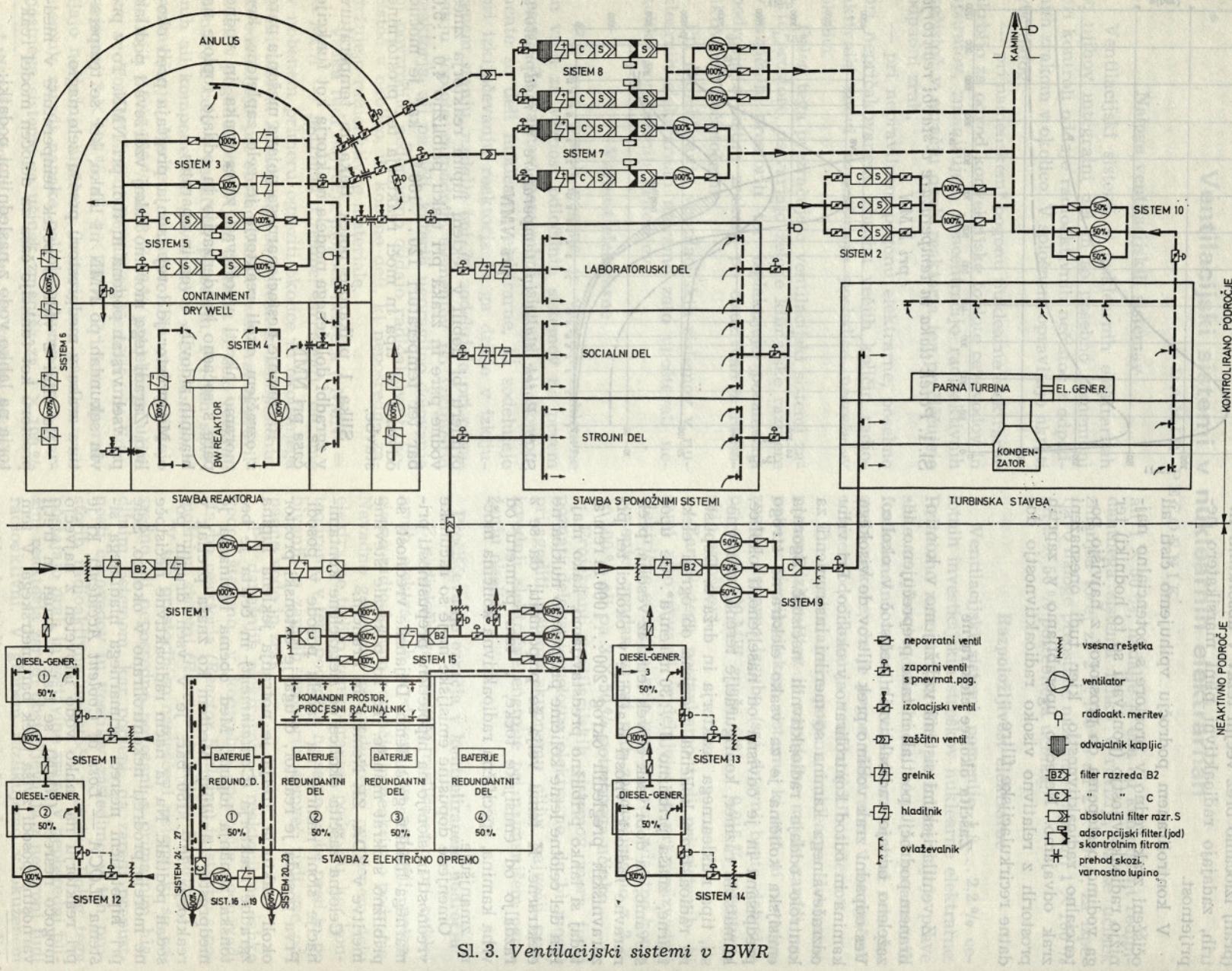
Računanje nestacionarnega pojava mešanja pare z ozračjem okoli reaktorja je zelo zapleteno, ker moramo hkrati upoštevati zmes zraka in vodne pare s sočasno kondenzacijo in oddajo toplote na hladnih zidovih, cevih in aparatih.

Medprostor je torej zadnja pregraja pred okolico. Zaradi tega moramo tukaj vzdrževati podtlak pri vseh vrstah pogona in tudi pri NMN. To v prvih sekundah po NMN ni lahko, ker se temperatura zraka v medprostoru poviša zelo naglo.

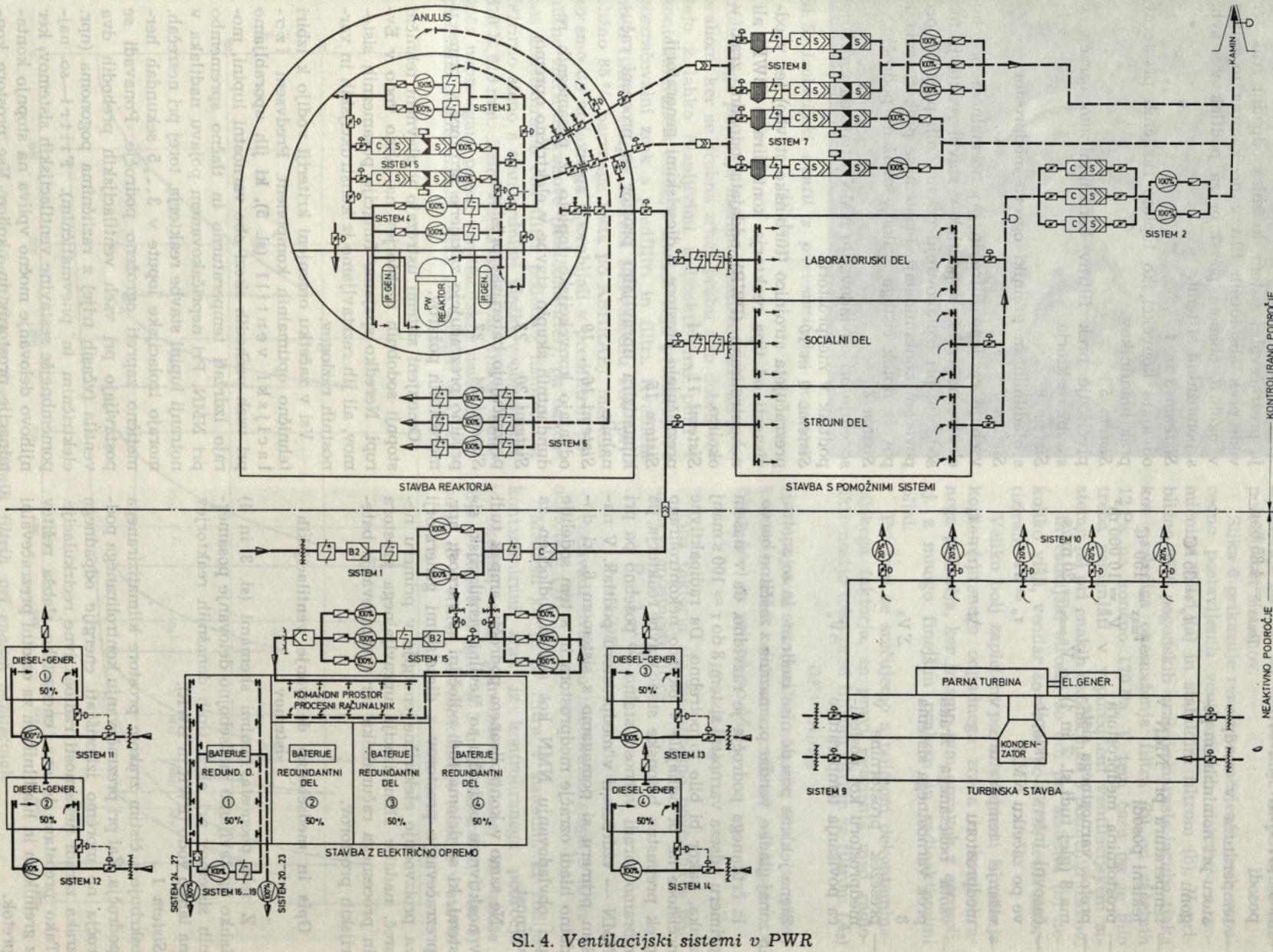
Na sliki 2 vidimo potelek temperature v medprostoru kot funkcijo časa za določen model reaktorja na lahko vodo z naslednjimi podatki:

- tlak v medprostoru pri $p_0 < 1,0$ bar namenskem pogonu ($\approx 1,5$ mbar podtlaka)

* rem — kratica za »*roentgen equivalent man*«, je enota za označbo biološkega efekta, ki ga ima doza ionizirajočega sevanja, absorbirana od človeka ali sesalca; m rem/a — letna količina v miliremih.



Sl. 3. Ventilacijski sistemi v BWR



Sl. 4. Ventilacijski sistemi v PWR

- tlak pri NMN v jekleni posodi
- temperatura v medprostoru pri nominalnem pogonu
- temperatura pri NMN v jekleni posodi
- prostornina medprostora
- pretok varnostnega sistema 8 (glej tudi sl. 3 in 4)
- časovni interval vklopitve po začetku NMN
- višanje temperature v medprostoru
- vsota odsesanega zraka prek varnostnega sistema 8
- presežek prostornine v medprostoru kot posledica povišanja temperature

$$p_{\max} = 4,85 \text{ bar}$$

$$t_0 = 35^\circ\text{C}$$

$$t_{\max} = 150^\circ\text{C}$$

$$V_0 = 10\,000 \text{ m}^3$$

$$\dot{V}_{8\max} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\tau_0 = 5 \text{ s}$$

$$\Delta t = t(\tau) - t_0$$

$$\Sigma V_8$$

$$\Delta V_0$$

Stene jeklene posode niso izolirane in so znotraj in zunaj gladke, vendar premazane z zaščitno barvo.

Iz črtkanega področja je razvidno, da v našem primeru odsesa varnostni sistem 8 do $\tau \approx 100$ s manj zraka, kakor bi bilo to potrebno. Da radioaktivne nečistoče ne bi odhajale v okolico nekontrolirano prek prepustne betonske stene stavbe reaktorja, pa moramo zaradi varnosti stalno — posebno pa pri NMN — vzdrževati v medprostoru podtlak. V našem primeru si pomagamo s sistemom 6, ki dodatno hlači ozračje medprostora in s tem sodeluje pri obvladovanju NMN kot sistem, odločilen za varnost.

Ne samo v kontroliranem področju ampak tudi v neaktivnem področju so številni ventilacijski sistemi, ki so deloma tudi odločilni za varnost, npr. prezračevanje prostorov z dieselskimi generatorji za proizvodnjo električne energije v primeru nesreč, nadalje klimatizacija upravljalnega prostora in procesnega računalnika ter prezračevanje baterijskih prostorov.

Opis in medsebojno delovanje ventilacijskih sistemov

Z zelo poenostavljenimi shemami (sl. 3 in 4) lahko ugotavljamo medsebojno delovanje posameznih sistemov pri obeh tipih današnjih reaktorjev na lahko vodo (PWR in BWR).

Sistem 1

oskrbuje s čistim zrakom prostore klimatiziranega področja. Žal pri prezračevanju kontroliranega področja ne moremo izkoristi energije odpadnega zraka zaradi nevarnosti radioaktivne recirkulacije. Tako preostane le ena, energetsko slabša rešitev z grelnikom in hladilnikom za celotni prezračevalni pretok.

Sistem 2

je prezračevalni sistem, ki zbirajo odpadni zrak ter vodi prek absolutnih filterov do kamina in odtod v okolico, obenem pa skrbi za podtlak v stavbi s pomožnimi sistemi.

Sistema 3 in 4

odvajata konvekcijsko toploto različnih prostorov prek hladilnikov.

Sistem 5

prečiščuje prek filterov kontaminirano ozračje v stavbi reaktorja.

Sistem 6

s hladilniki in grelniki ogreva medprostor.

Sistem 7

vsebuje različne filtre in pri normalnem pogonu elektrarne vzdržuje podtlak v stavbi reaktorja ter sodeluje pri izplakovovanju posameznih področij pri povečani kontaminaciji. Pri tem se prek sistema 1 poveča dotok čistega zraka v okuženo področje.

Sistem 8

sodeluje pri obvladovanju NMN s tem, da vzdržuje podtlak v medprostoru.

Sistema 9 in 10

prezračuje strojnico (turbinsko stavbo) ter v odvisnosti od tipa reaktorja kontrolirano (BWR) ali nekontrolirano (PWR) oddajata odpadni zrak v okolico.

Sistemi 11...14

prezračujejo prostore z dieselskimi generatorji.

Sistem 15

klimatizira upravljalni prostor in procesni računalnik.

Sistemi 16...19

odvajajo konvekcijsko toploto iz posameznih redundantnih skupin stavbe v električno opremo.

Sistemi 20...23

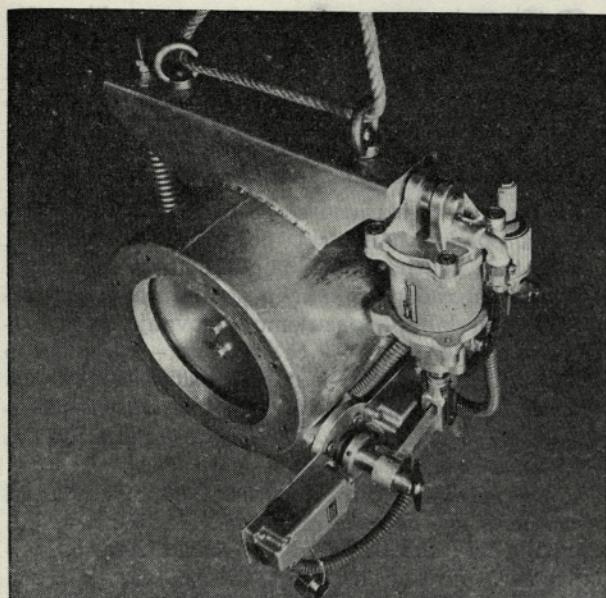
prezračujejo baterijske prostore.

Sistemi 24...27

prisilno prezračujejo zakajene prostore v primeru morebitnih požarov.

Omenjeni sistemi ustrezajo v glavnem tehnični stopnji sodobnih reaktorjev na lahko vodo v Evropi. Neredko spajamo funkcije posameznih sistemov, ali jih razstavljamo iz konstrukcijskih in varnostnih razlogov.

Vsi v začetku omenjeni kriteriji vodijo k izbiri tehnično optimalnih komponent. Predvsem izolacijski ventili (sl. 5), ki jih uporabljamo pri vseh prehodih skozi obe varnostni lupini, morajo izdržati temperaturno in tlačno spremembu pri NMN. Pri nepričakovanim pojavi nadtlaka v notranji lupini stavbe reaktorja, torej pri nesrečah, morajo izolacijske lopute v 3...5 sekundah hermetično zapreti ogroženo področje. Ponavadi se postavljajo pri vseh ventilacijskih prehodih dva ventila (včasih trije) z različnima pogonomi (npr. električnim in pnevmatičnim). Filtri so najpomembnejše sestavine ventilacijskih sistemov, ker njihovo delovanje močno vpliva na stopnjo kontaminacije prostorov in okolice. Vse prostore kon-



Sl. 5. Izolacijski ventil s pnevmatičnim pogonom
(Sulzer)

troliranega področja moramo namreč varovati pred prahom, ker se drobna zrnca prahu zelo dobro vežejo z lahko hlapljivimi radioaktivnimi plini v kontaminiranem ozračju. Zaradi tega prečiščujemo prezračevalni zrak s predfiltrji in filtri. Kvaliteta obeh filtrov skupaj ustreza SFI-razredu »C« (približno 85 % barvnega testa po ASHRAE). Medtem ko smo do nedavnega uporabljali v predfiltrih pomicne filtrirne trakove (*Rollbandfilter*), pa dandas konstruiramo oba filtra podobno, namreč kot filtrirno steno s standardnimi vložki v obliki vreč 610×610 mm. Zelo velika površina filtrov omogoča nepretrgani pogon ventilacijskih sistemov pri približno stalni izgubi tlaka do enega leta, kar

zmanjšuje stroške za vzdrževanje in povečuje razpoložljivost sistemov.

Slika 6 prikazuje rezultate merjenja dveh vzporedno postavljenih ventilacijskih sistemov s pomicnimi filterji (a) in stabilnim filtrom (b). V približno 8600 pogonskih urah je narasla izguba tlaka kot posledica onesnaženja filtra (b) od začetnih 12 Pa na končno 170 Pa. V tem času pa je bilo treba zamenjati v vzporednem ventilacijskem sistemu (a) pri enakih okoliščinah 6 pomicnih trakov.

Investicijski stroški so bili pri sistemu (b) nekoliko višji, vendar so se že po štirih letih amortizirali.

Veliko bolj zapleteni pa so problemi filtriranja kontaminiranega odpadnega zraka iz kontroliranega področja, ker imamo tam opravek z aerosoli, tj. z mnogo finejšim prahom in radioaktivnimi plini.

Pri tem se srečujemo s pojmom dekontaminacijskega faktorja, se pravi kvocient med radioaktivnostjo toka pred filtrom (A_1) in za filtrom (A_2)

$$DF = A_1/A_2$$

in s pojmom izločevalne stopnje filtra, se pravi kvocient med količinama nečistoč — izločeno v filtru (A_F) in privedeno (A_1)

$$IS = A_F/A_1.$$

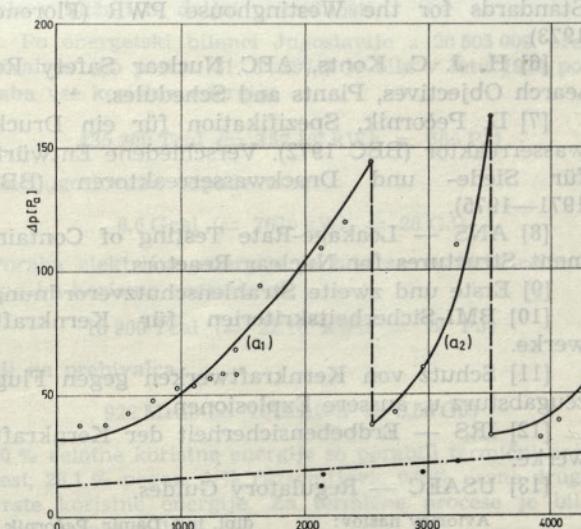
Oba faktorja sta medsebojno povezana s pojmom prepustnosti filtra

$$P = 1 - IS;$$

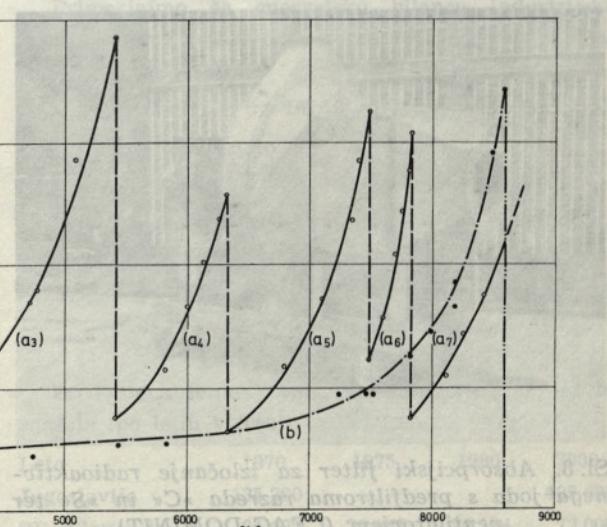
$$P = 1/DF \quad A_2 = A_1 - A_F$$

Ponavadi izražamo izločevalno stopnjo filtra v odstotkih [%].

Medtem ko je IS filtra v sistemih, ki vodijo kontaminirani zrak iz kontroliranega področja v okolico, zelo pomemben faktor, ki znaša 99,9...99,999 % (glej sl. 3 in 4; sistemi 2, 7 in 8) pa je IS v filtrih, ki recirkulirajo ozračje v stavbi



Sl. 6. Izbira tlaka v dveh različnih filtrih pri enakih okoliščinah



reaktorja (sistem 5) manj pomemben. Veliko pomembnejše je razmerje pretoka proti celotni prostornini stavbe. Pri tej vrsti recirkulacijskega filtriranja kontaminiranega ozračja računamo podobno kakor pri radioaktivnem razpadu elementov — s polovično filtrirno dobo, tj. s časom, v katerem zmanjšamo začetno koncentracijo na polovico.

Polovična filtrirna doba se izračunava po enačbi

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \tau}; \lambda = \dot{V}_F/V_0; A/A_0 = 0,5$$

$$\tau = 0,693 V_0/\dot{V}_F [h]$$

kjer pomenijo:

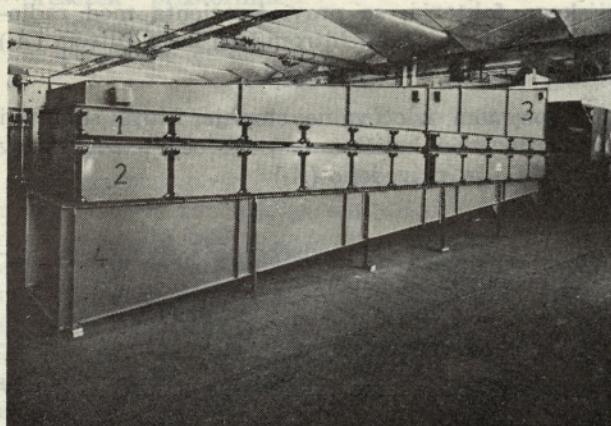
A_0 [Ci] * — radioaktivnost ozračja v začetku

A [Ci] — radioaktivnost po času τ ,

V_0 [m^3] — prostornina stavbe,

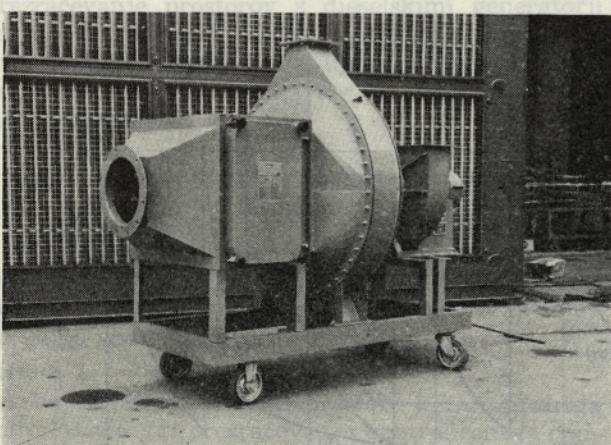
\dot{V}_F [m^3/h] — pretok skozi filter,

τ [h] — čas.



Sl. 7. Dvojna filtrirna steza s predfiltri (1), razreda »C« in absolutnimi filtri (2) razreda »S«

Vstop kontaminiranega zračnega toka je desno zgoraj (3), izstop levo spodaj (4). Celotni pretok $\approx 45\,000 m^3/h$. (CEAG-DOMINIT)



Sl. 8. Absorpcijski filter za izločanje radioaktivnega joda s predfiltrom razreda »C« in »S« ter ventilatorjem (CEAG-DOMINIT)

Pri tem je zanemarjena prepustnost filtra (P) in dejanski razpad radionuklidov v ozračju.

Slike 7 in 8 prikazujeta dve izvedeni filtrirni napravi, eno kombinirano z absolutnim in adsorpcijskim filtrom in drugo z absolutnimi filteri.

Pogon in regulacija ventilacijskih sistemov

Nuklearne elektrarne so se dandanes tako razvile, da poteka namenski pogon vseh sistemov, seveda tudi ventilacijskih, popolnoma avtomatično. S procesnim računalnikom in signali na upravljalnih ploščah lahko opazujemo delovanje vseh pomembnih sistemov in — če je treba — popravimo nepravilnosti posameznih regulacijskih krogov. Vsi sistemi so tako zgrajeni, da pri nepravilnem delovanju ene komponente samostojno preklopijo na redundantno enoto ali sistem.

Celo manjše požare morajo sistemi obvladati brez zastoja v električni proizvodnji. Šele pri večjih nesrečah, kakršne so potresi, avionske nesreče, veliki požari, plinske eksplozije ali sabotaže, je treba računati z zastojem pri posameznih sistemih, toda za varnost odločilni sistemi pa morajo opravljati svojo nalogo brez zastojev. Prav zato, ker je funkcija varnostnih sistemov zelo pogosto odvisna od klimatizacije prostorov, v katerih so postavljeni, so ventilacijski sistemi v nuklearnih elektrarnah pomembna nujnost.

LITERATURA

- [1] M. Hudina, Das Notabluftsystem der AKW Mühleberg (BBC Baden, 1967).
- [2] G. Rabbel, Dr. H.-J. Strauss, Luftfilter für kerntechnische Anlagen (Klima-Technik).
- [3] J. G. Wilhelm, Treatment of Airborne Radioactive Wastes (Wien 1968).
- [4] Dr. H.-J. Strauss, Luftreinigung (VDI-Bildungswerk).
- [5] L. O. Wredberg, Design Criteria, Codes and Standards for the Westinghouse PWR (Florence 1973).
- [6] H. J. C. Korts, AEC Nuclear Safety Research Objectives, Plants and Schedules.
- [7] D. Pečornik, Spezifikation für ein Druckwasserreaktor (BBC 1972). Verschiedene Entwürfe für Siede- und Druckwasserreaktoren (BBC 1971—1975).
- [8] ANS — Leakage-Rate Testing of Containment Structures for Nuclear Reactors.
- [9] Erste und zweite Strahlenschutzverordnung.
- [10] BMI-Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke.
- [11] Schutz von Kernkraftwerken gegen Flugzeugabsturz u. äußere Explosionen.
- [12] IRS — Erdbebensicherheit der Kernkraftwerke.
- [13] USAEC — Regulatory Guides.

Avtorjev naslov:

dipl. ing. Damir Pečornik,
vodja projektne skupine pri
podjetju Brown, Boveri & Co,
Mannheim

* Ci — kratica za curie (kiri) = enota radioaktivnosti.