



ÚŘAD PRO VYNÁLEZY
A OBJEVY

POPIS VYNÁLEZU K AUTORSKÉMU OSVĚDČENÍ

195639

(11) (B1)

(51) Int. Cl.³
G 21 C 15/18

/22/ Přihlášeno 06 06 78
/21/ /PV 3662-78/

(10) Zveřejněno 31 05 79

(45) Vydáno 15 04 82

(75)

Autor vynálezu

SÝKORA DALIBOR ing., PRAHA

(54) Hybridní způsob havarijního dochlazování rychlého jaderného reaktoru chlazeného tekutým kovem a zařízení k jeho provádění

1

Vynález řeší způsob havarijního dochlazování rychlého jaderného reaktoru chlazeného tekutým sodíkem, který vzhledem ke specifickým charakteristikám těchto reaktorů i k uvažovaným parametrům a výkonům odpovídajících elektráren představuje velmi náročnou oblast technické a radiační bezpečnosti budoucích zdrojů elektrické energie. Vynález, který představuje zatím nejúčinnější způsob a systém havarijního dochlazování, je založen na využití hlavního provozního, respektive technologického zařízení.

Dosud je u realizovaných nebo vyprojektovaných jaderných elektráren s rychlými, sodíkem chlazenými reaktory provedeno nebo navrženo havarijní dochlazování buď pomocí speciálních dochlazovacích smyček, nebo prostřednictvím hlavního technologického zařízení. Z důvodu zvyšování provozní bezpečnosti počítají některé projekty komerčních elektráren se současnou aplikací obou způsobů, tj. s realizací obou uvedených systémů zároveň. Je zřejmé, že principiální nevýhodou speciálních dochlazovacích smyček je jejich jednocelovost, ze které plyne, že poměrně drahé zařízení není využíváno při normálním bezporuchovém provozu.

Mimoto pro zajištění funkční spolehlivosti vyžadují speciální dochlazovací smyčky určitá zvláštní provozní opatření, periodické kontroly pohotovosti i pečlivou údržbu. Existence těchto smyček se řadou návazností promítá do dalších provozních souborů, zejména do souborů pomocného nebo servisního charakteru, jako jsou hospodářství tekutých kovů a hospodářství plynové. Pokud jsou

2

speciální dochlazovací smyčky naplněny sodíkem, představuje jejich ohřívací systém navíc trvale pracující spotřebič elektrické energie. Proto je dnes preferováno havarijní dochlazování prostřednictvím stávajícího hlavního technologického zařízení.

Tento způsob dochlazování je přirozený, neboť vychází z inherentních vlastností dané jaderné elektrárny. Na intenzitu dochlazování, respektive na výkon systému samocirkulačního odvodu zbytkového tepla z reaktoru a na jeho rozptyl do okolí má vliv řada faktorů. Mezi hlavní faktory nutno zahrnout přípustné mezni přechodové, respektive havarijní teplotnické parametry, zejména u reaktoru a celého primárního i sekundárního sodíkového okruhu, dále dispoziční řešení dané jaderné elektrárny, především výškové rozmístění teplosměnného zařízení obou okruhů, a také způsob a systém odvodu zbytkového tepla z parogenerátorů do dalších zařízení, respektive médií.

Nejrozšířenější je odvod tohoto tepla teplonosným médiem terciálního, tj. parovodního okruhu - a to buď do hlavních turbínových kondenzátorů, nebo do zvláštních technologických kondenzátorů, z nichž je zbytkové teplo odváděno například uzavřeným chladicím okruhem, a tímto v chladicích věžích rozptýlováno do atmosféry jakožto odpadní teplo. Různá schematická a dispoziční řešení vyžadují vždy instalaci příslušného počtu havarijních čerpadel, jimiž jsou pomocné napáječky, kondenzátka a chladičky, jejichž elektromotory musí být připojeny na zdroje zajištěného napájení.

Ve všech dosud známých případech se však

zbytkové teplo ve formě páry nebo/a ohřátého vzduchu rozptyluje bez jakéhokoliv využití do atmosféry. Přitom ale existují značné výkonové a pohotovostní požadavky na zdroje zajištěného napájení pro pohon výše uvedených havarijních čerpadel. Je zřejmé, že toto jsou hlavní nevýhody dosavadních způsobů a systémů havarijního dochlazování.

Pro úplnost informace o současném stavu techniky havarijního dochlazování rychlých reaktorů chlazených sodíkem nutno podotknout, že je u tohoto typu jaderných elektráren atraktivní i přímý odvod zbytkového tepla vzduchem. Nejvhodnější napojení poskytuje sekundární sodíkový okruh, zejména jsou-li použity modulové parogenerátory. Takový systém, jakožto rezervní je vytvořen v francouzské prototypové elektrárně o elektrickém výkonu 250 MW. Přestože tento systém prokázal svoji účinnost i snadnou realizovatelnost, zůstal v důsledku použití jen přirozeného tahu vzduchu výkonově nízký pod výkonem hlavního systému dochlazování, který využívá parovodní stranu parogenerátoru. Nedostatečný výkon tohoto vzduchového systému je jedinou, ale zásadní jeho nevýhodou.

Jednotlivé nevýhody všech výše uvedených způsobů realizovaných, nebo zatím jen navržených způsobů a systémů havarijního dochlazování odstraňuje hybridní způsob havarijního dochlazování rychlého jaderného reaktoru chlazeného tekutým kovem podle vynálezu, založený na současném odvodu zbytkového tepla do okolní atmosféry jak teplotnosným médiem parovodního okruhu, tak i vzduchem, jehož podstata spočívá v tom, že se na vzduch působí ejekčním účinkem, způsobeným v parovzdušném ejektoru hmotou a energií teplosnosného média parovodního okruhu, a to za účelem zvýšení rychlosti vzduchu ve vzduchových kanálech, a tím intenzifikování tahu vzduchu okolo povrchu teplotvodného zařízení, například okolo vnějšího povrchu modulových parogenerátorů nebo/a okolo povrchu modifikovaných vyrovnávacích nádrží, eventuálně i okolo povrchu reaktorové nádoby.

Pro provádění tohoto způsobu je použit soubor zařízení zajišťující pomocí tlakového nebo gravitačního havarijního napájení parogenerátoru dlouhodobou intenzifikaci tahu vzduchu. Podstata zařízení spočívá v tom, že sestává z přívodního potrubí a parovzdušného ejektoru, umístěného v kanále horkého vzduchu, jehož hnací dýza je napojena přívodním potrubím na parní prostor napájecí nádrže a/nebo na parní potrubí, respektive na modulový parogenerátor, jakož i z pomocného napájecího potrubí a pomocného parního potrubí s armaturami, která jsou instalována tak, že je možné při havarijním dochlazování propojit modulový parogenerátor a napájecí nádrž na jejich vodní, respektive parní straně. Přitom v přívodním potrubí je instalována samočinná redukční armatura nebo/a protitlaká turbínka pro pohon havarijní turbonapáječky, jejichž výstupy jsou na hnací dýzu napojeny přívodním potrubím buď přes napájecí nádrž, nebo přímo.

Technický pokrok a celkově vyšší účinek navrženého hybridního způsobu havarijního dochlazování prokazují tyto jeho základní výhody.

Pro "likvidaci" zbytkového tepla generovaného reaktorem po jeho havarijním odstavení se využívá rovněž páry vyrobené právě tímto zbytkovým teplem v průběhu havarijního dochlazování. Tato skutečnost předstává principiálně nové energetické využití zbytkového tepla, a to právě v systému pro jeho odvod a rozptyl do atmosféry. Za druhé, dosahuje se součtového, a tedy podstatně

zvětšeného výkonu celého systému odvodu a rozptylu zbytkového tepla, což je dáno získanou intenzifikací vzduchového chlazení.

To umožňuje spolehlivé dochlazování reaktoru polovičním počtem modulových parogenerátorů, což znamená, že druhá polovina z jejich celkového počtu představuje stoprocentní rezervu, respektive druhý stejně výkonný, a přitom technicky identický záložní systém havarijního dochlazování. Z toho důvodu odpadá nutnost realizovat nákladné dochlazovací smyčky nebo velké jednodíselové havarijní výměníky sodík-vzduch, jakožto záložní systémy havarijního dochlazování. Za třetí, sníží se nároky na velikost a pohotovost dodávky zajištěné elektrické energie nezbytné pro funkci dosavadních jak základních, tak záložních systémů havarijního dochlazování.

Za čtvrté, oproti čistě samotážnému vzduchovému dochlazovacímu systému se zmenší potřebné průtočné průřezy, a tím i rozměry, hmotnosti a cena jak vzduchových kanálů, tak i uzávěrů hermetických krabic modulových parogenerátorů. Za páté, zmenší se, respektive odpadá komínová nástavba pro zvětšení přirozeného tahu vzduchu modulovým parogenerátorem při havarijním dochlazování, což má vedle technickoekonomického významu i cenný přínos estetický, vzhledem k architektonickému řešení hlavního výrobního bloku příslušné jaderné elektrárny.

Za šesté, efektivnost použitého fundamentálního zařízení, tj. parovzdušného ejektoru, je už prokázána v jiných oborech. Například u některých dřívějších aerodynamických tunelů s otevřeným okruhem, založených na ejekčním účinku parního proudového přístroje, byly v měřicích kanálech dosaženy nejen vysoké podzvukové rychlosti, ale i nadzvukové rychlosti vzduchu. Tato zařízení překonávala všechna ostatní zařízení svou jednoduchostí a spolehlivostí.

Za sedmé, předemtný způsob havarijního dochlazování pronikavě zvyšuje schopnost konkurence modulového parogenerátoru, který jako jediný ze všech typů parogenerátorů je ve skutečnosti zařízením dvouúčelovým. Tím roste jak pravděpodobnost uplatnění modulových parogenerátorů původní československé mikromodulové koncepce, tak i naděje na jejich komerční úspěch, neboť jejich výrobní technologie je v ČSSR řadu let zvládnuta a jejich výroba československým průmyslem osvojena.

Na připojených výkresech jsou znázorněny příklady hybridního způsobu havarijního dochlazování rychlého jaderného reaktoru chlazeného tekutým kovem podle vynálezu, kde na obr. 1 je jednoduché základní schéma příslušného systému, na obr. 2 je schéma stejného systému, upraveného pro možnost vysokotlakého havarijního napájení modulového parogenerátoru, a posléze na obr. 3 je schéma upraveno vzhledem k použití nízkotlakého gravitačního havarijního napájení.

Podle obr. 1 tvoří systém havarijního dochlazování následující zařízení: potrubí 3 tekutého sodíku, napojené na modulový parogenerátor 4, k němuž je dále připojeno jak parní potrubí 13, tak napájecí potrubí 12, které propojuje dále i napájecí nádrž 10 s napájecím čerpadlem 11. Krabice 23 modulového parogenerátoru vytváří okolo modulového parogenerátoru 4 prostor s inertní atmosférou. Krabice 23 modulového parogenerátoru, mající vstupní uzávěr 17 a výstupní uzávěr 15, se nachází mezi kanálem 16 studeného vzduchu a kanálem 14 horkého vzduchu, který přechází v komínovou nástavbu 24.

V kanále 14 horkého vzduchu je vestavěn parovzdušný ejektor 62, jehož hnací dýza 63

je prostřednictvím přívodního potrubí 61, redukční armatury 64 a několika již neoznačených armatur napojena na páru v napájecí nádrži 10 a v parním potrubí 13, i na páru v modulovém parogenerátoru 4. Funkce zařízení je následující. Při normálním provozu probíhá přenos tepla za sekundárního sodíku proudícího potrubím 3 tekutého sodíku do modulového parogenerátoru 4, ve kterém se z vody dodávané napájecím čerpadlem 11 z napájecí nádrže 10 vyrábí přehřátá pára, která se vede parním potrubím 13, ke zde již neznázorněné parní turbíně.

Přítom jsou uzavřeny jak výstupní uzávěr 15, tak i vstupní uzávěr 17 a samozřejmě i obě uzavírací armatury, umístěné v přívodním potrubí 61. Při vzniku havarijního stavu je přiveden za systému havarijní ochrany impuls + I, který spustí příslušné servopohony, a tím otevře výstupní uzávěr 15, vstupní uzávěr 17 i obě uzavírací armatury v přívodním potrubí 61. Předtím už došlo k odstavení reaktoru, uzavření přívodu páry k turbíně a odpojení turbogenerátoru od vnější sítě. Nastává režim havarijního dochlazování reaktoru. Odvod akumulovaného, a dále generovaného zbytkového tepla probíhá v modulovém parogenerátoru 4, a to jak přes vnitřní teplosměnnou plochu, tj. přes stranu vody a páry, tak přes vnější plochu, tj. přes stranu vzduchu.

Průtok vzduchu modulovým parogenerátorem 4 je silně intenzifikován činností parovzdušného ejektoru 62, jehož hnací dýza 63 je napojena přívodním potrubím 61 na páru nacházející se v parním potrubí 13, a tím také na páru dále generovanou v modulovém parogenerátoru 4, i na páru v napájecí nádrži 10. Jsou zde uvedena dvě možná řešení přívodního potrubí 61 pro dvě spojení zdrojů páry. Při sériovém spojení modulového parogenerátoru 4 s napájecí nádrží 10 proudí vysokotlaká přehřátá pára nejprve přes redukční armaturu 64, postupně přes vodní a parní prostor napájecí nádrže 10 do hnací dýzy 63.

Tím se u páry z modulového parogenerátoru 4 sníží počáteční tlak a teplota, a po celou dobu první etapy dochlazování bude proudit do hnací dýzy 63 pára o prakticky konstantních parametrech, daných parametry vody, respektive páry v napájecí nádrži 10. Je zřejmé, že teplo odpovídající přehřátí vysokotlaké, respektive zredukované páry se převede na teplo výparné u příslušného množství vroucí vody, které se jí odpaří v napájecí nádrži 10 v důsledku zavedení přehřáté páry do vodního prostoru napájecí nádrže 10. Redukční armatura 64 snižuje tlak páry na hodnotu v rozmezí provozního a maximálního provozního tlaku v napájecí nádrži 10, který je určen nastavením a provedením již neznázorněného pojistného ventilu, který chrání napájecí nádrž 10 proti tlakovému přetížení. Při paralelním řazení modulového parogenerátoru 4 a napájecí nádrže 10, které je znázorněno čárkováně, musí být v přívodním potrubí 61 instalovány dvě zpětné armatury.

Redukční armatura 64 je zde nastavena na tlak vyšší, než je tlak v napájecí nádrži 10. Do hnací dýzy 63 přichází nejprve zredukovaná pára přehřátá a až po "vysušení" a odtlakování modulového parogenerátoru 4 dojde k využití páry odebírané z napájecí nádrže 10. Výhodnější je výše popsané řazení sériové. Na obr. 2 je znázorněno principiální řešení hybridního systému havarijního dochlazování, které umožňuje značné časové prodloužení havarijního dochlazování. Označení většiny zařízení je shodné se zařízením už popsaným při vysvětlení obr. 1.

Hlavní rozdíl je zde dán tím, že místo redukční armatury je v přívodním potrubí 61 instalována protitlaká turbínka 65, která pohání havarijní turbonapáječku 66, umístěnou spolu s regulační armaturou 72 a zpětnou armaturou 73 v pomocném napájecím potrubí 71. Vysoká spolehlivost funkce a pohotovost protitlaké turbíny 65 je dána mimo jiné tím, že během normálního provozu je protitlaká turbínka 65 a celá příslušná trasa přívodního potrubí 61 nahřátá na teplotu blízkou teplotě sytosti páry v napájecí nádrži 10. Odvaděč kondenzátu 67 odpouští kondenzát vznikající z páry v důsledku tepelných ztrát do okolí u vyhříváního zařízení.

Při funkci tohoto systému dochází z protitlaké turbíny 65 k polytropické expanzi páry, čímž velmi poklesne její tlak i teplota. Proto může být emisní pára zavedena přímo do parního prostoru napájecí nádrže 10, což je na druhé straně i účelné z hlediska spolehlivého startu protitlaké turbíny 65. Alternativní napojení emisní páry přímo do hnací dýzy 63 je obdobou alternativní řazení zdrojů páry, které byly uvedeny výše v popisu obr. 1. Na obr. 2 jsou dále naznačeny ideové návrhy autonomní ztrátové regulace jak na havarijním napájení parogenerátoru 4, tak na přívodu páry k protitlaké turbíně 65.

Impuls - H, odebíraný například od hladiny vody v již nenakresleném separátoru páry modulového parogenerátoru 4, ovládá polohu regulační armatury ve výtlačku havarijní turbonapáječky 66. Při zvyšování hladiny se regulační armatura 72 přivírá a naopak. Impuls - P, vznikající při změně tlaku páry v napájecí nádrži 10, ovládá podobným způsobem regulační armaturu umístěnou v přívodním potrubí 61 před protitlakou turbínkou 65. Na obr. 3 je naznačena varianta hybridního systému dochlazování, u které je prodloužení funkce systému zajištěno nízkotlakým gravitačním napájením modulového parogenerátoru 4, a to po jeho předchozím odtlakování přes redukční armaturu 64.

Oproti obr. 1 a 2 jsou zde nová tato zařízení: pomocné parní potrubí 68, propojující parní potrubí 13 s parním prostorem napájecí nádrže 10 a v něm instalovaná uzavírací armatura 69 s tlakovým čidlem 70, které reaguje na zadaný nízký tlak v parním potrubí 13. Přítom proti obr. 2 je vypuštěna protitlaká turbínka s havarijní turbonapáječkou a odvaděčem kondenzátu. Funkce této varianty systému dochlazování je etapová. Nejprve proběhne výtok vysokotlaké přehřáté páry z modulového parogenerátoru 4 přes redukční armaturu 64 do vodního prostoru napájecí nádrže 10.

Z jejího parního prostoru se současně odvádí pára sytá a přivádí se ke hnací dýze 63. Po odtlakování modulového parogenerátoru 4, kdy je redukční armatura 64 plně a trvale otevřena, a tlak před ní se blíží tlaku v napájecí nádrži 10, otevře se impulsem od tlakového čidla 70 uzavírací armatura 69. Dojde k proudění páry pomocným parním potrubím 68, a tím k vyrovnání tlaků par v modulovém parogenerátoru 4 a v napájecí nádrži 10. Vzhledem k poloze, respektive ke značnému převýšení napájecí nádrže 10 nad modulovým parogenerátorem 4, vznikne průtok vody v pomocném napájecím potrubí 71, v regulační armatuře 72 a ve zpětné armatuře 73.

Tím nastane nízkotlaké gravitační napájení modulového parogenerátoru 4, které může trvat až do vyprázdnění napájecí nádrže 10. Regulační armatura 72, ovládaná zde rovněž od hladinového impulsu - H, ovlivňuje havarijní napájení tak, že z modulového

parogenerátoru 4 stále proudí přehřátá pára. Je evidentní, pokud to provedení modulového parogenerátoru 4 umožní, že lze uvažovat i o úplném "zaplavení" modulového parogenerátoru 4 při této druhé etapě havarijního dochlazování. Systém se potom zjednoduší v tom smyslu, že regulační armatura 72 a její regulace bude vypuštěna. V takovém případě by z modulového parogenerátoru 4 proudila dvoufázová parovodní směs a k separaci fází by docházelo buď v neznázorněném havarijním separátoru, nebo až uvnitř napájecí nádrže 10.

Nutno ještě dodat, že při eventuálním akceptování dochlazovacího režimu se "zaplaveným" modulovým parogenerátorem 4 je nutné nejprve prošetřit možnosti využití hlavní trasy napájení, tj. stanovit, zda havarijní napájení může nebo nemůže probíhat přes napájecí potrubí 12, napájecí čerpadlo 11 a všechna ostatní zde již neznázorněná zařízení, jimiž je vždy soustava vysokotlakých

regeneračních ohříváků a příslušných uzavíracích, zpětných a speciálních regulačních napájecích armatur. Při pozitivním výsledku prošetření odpadá instalace celého pomocného napájecího potrubí 71, nebo se jeho rozsah redukuje.

Předběžné aplikační úvahy se týkají konkrétní projekční studie modulových parogenerátorů pro komerční jadernou elektrárnu s rychlým reaktorem chlazeným sodíkem, jehož elektrický výkon se pohybuje okolo 1600 MW.

Lze předpokládat, že po vývoji výše popsaného přídavného zařízení a po jeho experimentálním i provozním ověření bude hybridní způsob a systém havarijního dochlazování atraktivní pro všechny velké jaderné elektrárny s rychlým reaktorem chlazeným sodíkem, s jejichž nasazením se dnes počítá v perspektivě jaderných programů v řadě zemí.

P R E D M Ě T V Y N Á L E Z U

1. Hybridní způsob havarijního dochlazování rychlého jaderného reaktoru chlazeného tekutým kovem, umožňující současný odvod zbytkového tepla generovaného v reaktoru po jeho havarijním odstavení do okolní atmosféry jednak teplotnosným médiem parovodního okruhu, jednak vzduchem, vyznačený tím, že se na vzduch působí ejekčním účinkem, způsobeným v parovzdušném ejektoru hmotou a energií teplotnosného média parovodního okruhu, a to za účelem zvýšení rychlosti vzduchu ve vzduchových kanálech, a tím intenzifikování tahu vzduchu okolo povrchu teplovedného zařízení, například okolo vnějšího povrchu modulových parogenerátorů nebo/a okolo povrchu modifikovaných vyrovnávacích nádrží, eventuálně i okolo povrchu reaktorové nádoby.

2. Zařízení pro provádění způsobu dochlazování podle bodu 1, zajišťující pomocí tlakového nebo gravitačního havarijního napájení parogenerátoru dlouhodobou intenzifikaci tahu vzduchu, zejména okolo modulového parogenerátoru opatřeného uzavíratelnou křabicí napojenou na vzduchové kanály, vyznačené tím, že sestává z přívodního potrubí /61/ a parovzdušného ejektoru /62/, umístěného v kanále horkého vzduchu /14/, jehož hnací dýza /63/ je napojena přívodním potrubím /61/ na parní prostor napájecí nádrže /10/ a/nebo na parní potrubí /13/, respektive na modulový parogenerátor /4/, jakož i z pomocného napájecího potrubí /71/

a pomocného parního potrubí /68/, přičemž pomocné napájecí potrubí /71/ a pomocné parní potrubí /68/ jsou napojena na modulový parogenerátor /4/ a napájecí nádrž /10/ na jejich vodní, respektive parní straně.

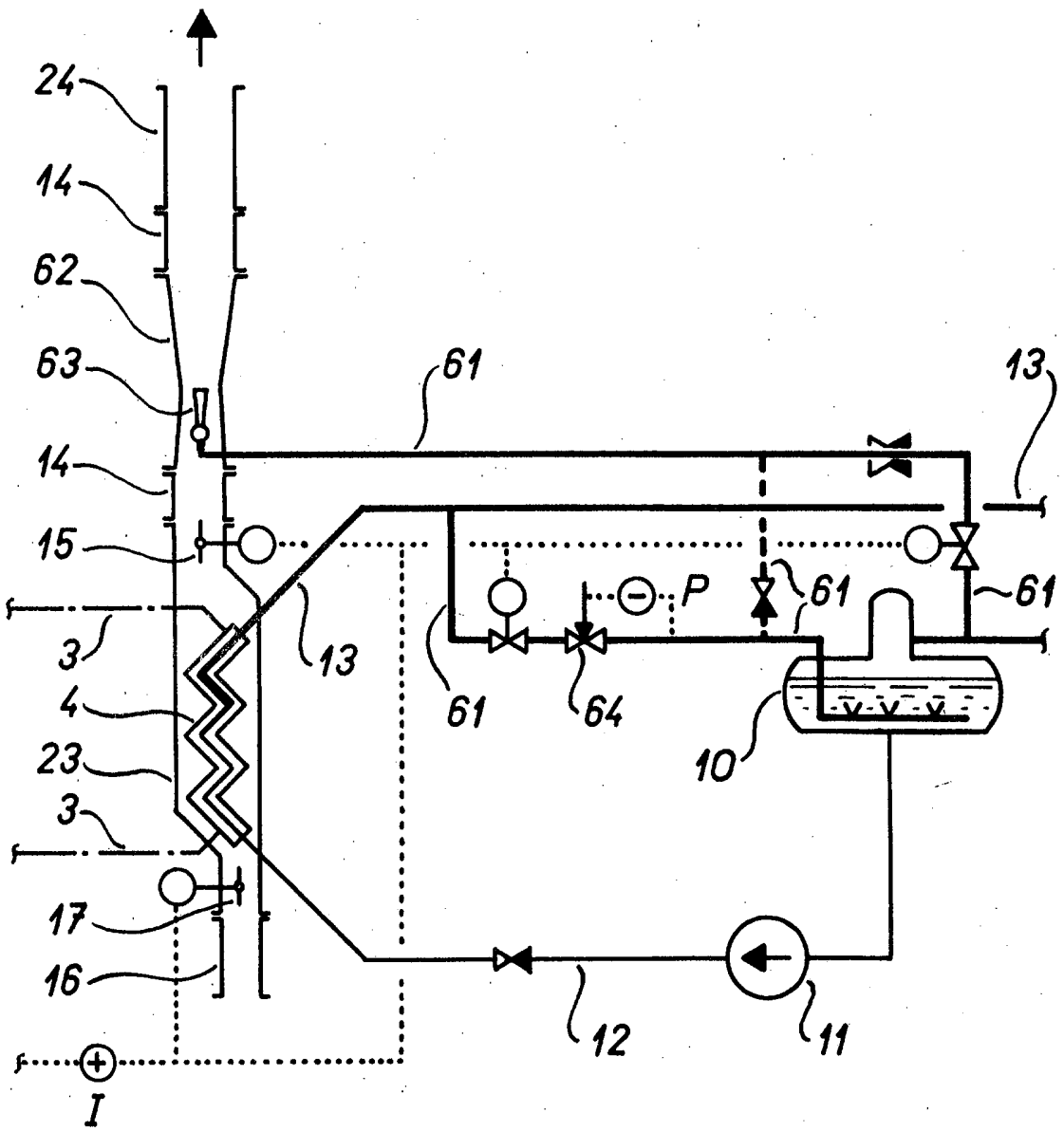
3. Zařízení podle bodu 2, vyznačené tím, že v prvním úseku přívodního potrubí /61/ je instalována samočinná redukční armatura /64/, jejíž výstup je na hnací dýzu /63/ napojen přívodním potrubím /61/ buď přes vodní a parní prostor napájecí nádrže /10/, nebo přímo.

4. Zařízení podle bodu 2, vyznačené tím, že v prvním úseku přívodního potrubí /61/ je instalovaná protitlaká turbínka /65/ spojená s havarijní napáječkou /66/, přičemž výstup protitlaké turbínky /65/ je na hnací dýzu /63/ napojen přívodním potrubím /61/ buď přes parní prostor napájecí nádrže /10/, nebo přímo.

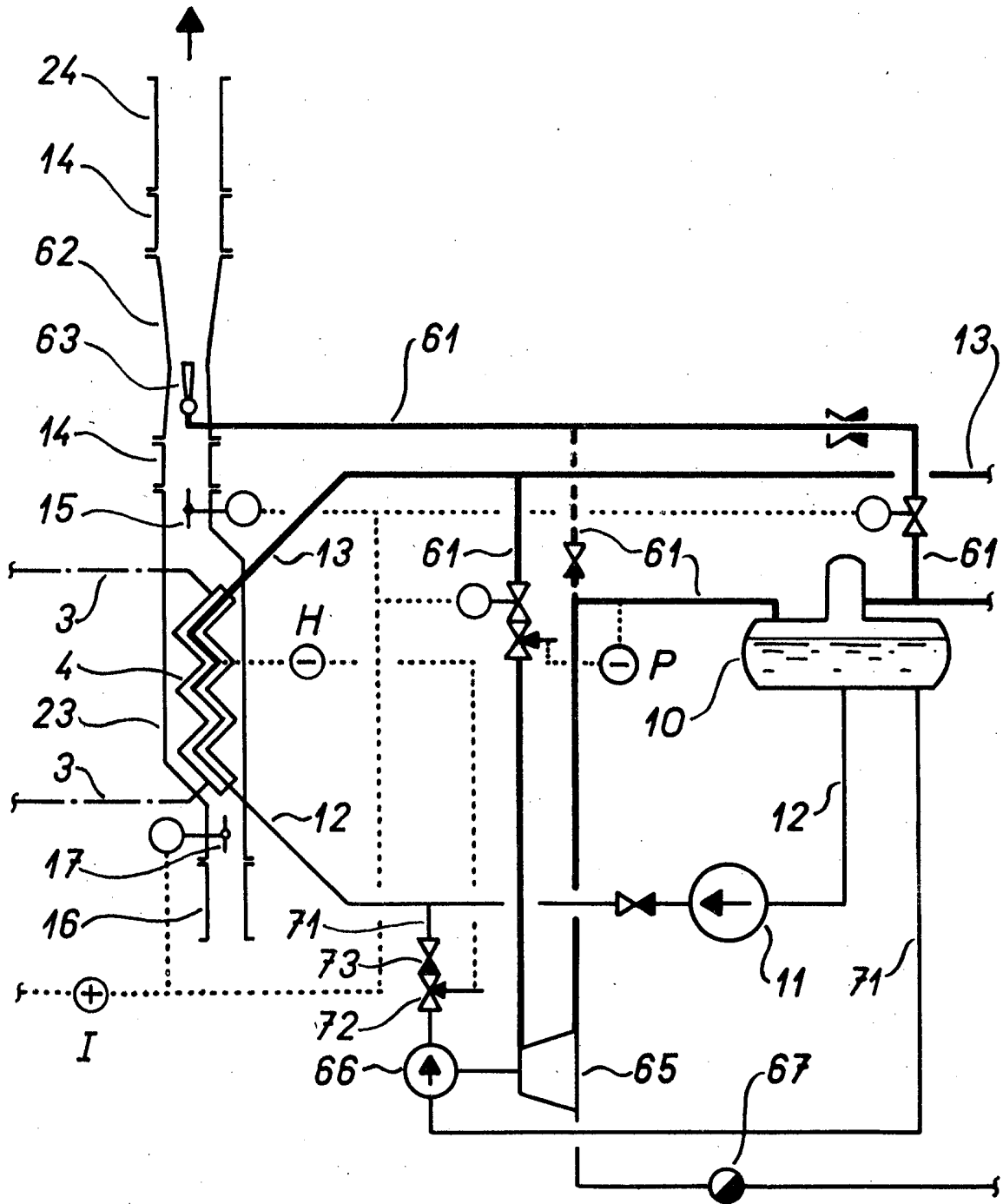
5. Zařízení podle bodu 2, vyznačené tím, že v pomocném napájecím potrubí /71/ je instalovaná regulační armatura /72/ a zpětná armatura /73/, popřípadě i havarijní turbo-napáječka /66/, která je spojena s protitlakovou turbínkou /65/.

6. Zařízení podle bodu 2, vyznačené tím, že v pomocném parním potrubí /68/ je instalovaná uzavírací armatura /69/, která pomocné parní potrubí /68/ dělí na vysokotlaký a nízkotlaký úsek a je ovládána tlakovým čidlem /70/.

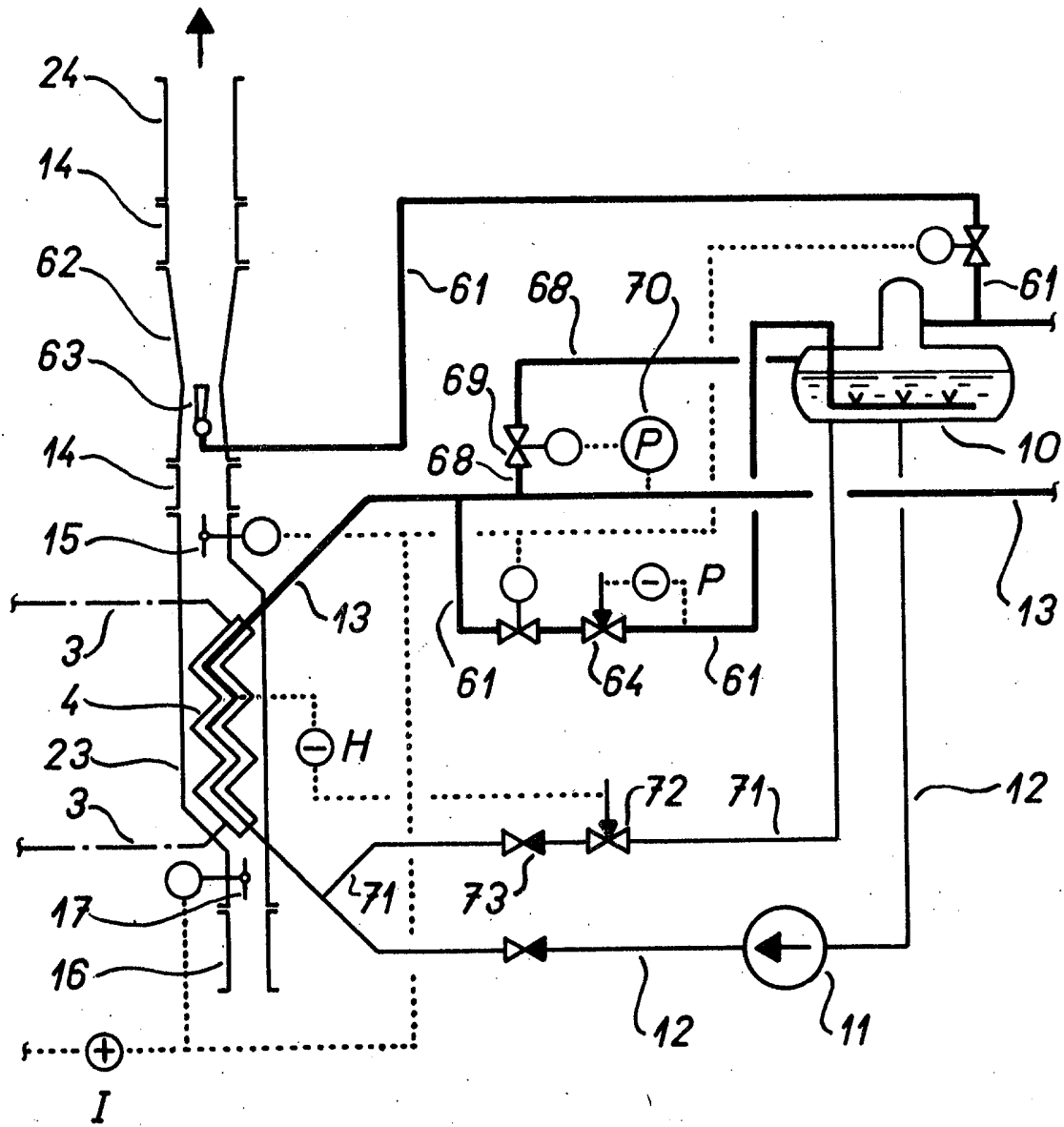
3 listy výkresů



OBR. 1



OBR. 2



OBR. 3