



ÚŘAD PRO VYNÁLEZY
A OBJEVY

POPIS VYNÁLEZU K AUTORSKÉMU OSVĚDČENÍ

228563

(11)

(B1)

(51) Int. Cl.³
G 21 D 5/12

(22) Přihlášeno 20 08 80

(21) (PV 3657-82)

(40) Zveřejněno 15 09 83

(45) Vydáno 15 08 86

(75)
Autor vynálezu

SÝKORA DALIBOR ing., PRAHA

(54) Integrované zařízení pro zvyšování a udržování tlaku teplotního média v primárním okruhu jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem

1

Vynález se týká zařízení pro zvyšování a udržování tlaku teplotního média v primárním okruhu jaderné elektrárny s tlakovodním, respektive vodovodním reaktorem během jejího spouštění a při energetickém provozu této elektrárny.

Dosavadní systémy zařízení zabezpečující nezbytný vysoký tlak teplotního média v primárních okruzích jaderných elektráren s tlakovodními reaktory jsou reprezentovány kompenzátorem objemu, ve kterém je nad hladinou teplotního média vytvořen a udržován vysokotlaký plynový-dusíkový nebo parní polštář. Dnes se používají už výhradně kompenzátory objemu s parním polštářem, jehož vznik a existence jsou zajištěny instalací a řízeným provozem vestavěných elektrických odporových ohříváků. Pro přívod energie k vytvoření a udržování vysokotlaké parní fáze teplotního média v nejvyšším místě primárního okruhu, tj. uvnitř parního kompenzátoru objemu, je kompenzátor ve své spodní části opatřen velkým počtem hrdel, ve kterých jsou odporové elektroohříváky uloženy. Celkový instalovaný výkon elektrického ohřívacího systému bývá většinou v rozmezí 1000 až 4500 kW. Podle velikosti výkonu jednoho elektroohříváku vychází pak jejich počet a tím i počet pro ně vytvořených hrdel v rozmezí

2

několika desítek až do zhruba dvou set kusů. Realizace těchto hrdel patří k nejnáročnějším technologickým operacím při výrobě parního kompenzátoru objemu. Z pevnostních důvodů je prstenec pláště parního kompenzátoru objemu, ve kterém jsou ohříváková hrdla umístěna, zesílen, což je rovněž nevýhodné. Další nevýhodou je nutnost vestavění sousedního nosného válcového pláště pro podepření vnitřních volných konců elektroohříváků, jejichž životnost je i při těchto konstrukčních opatřeních poměrně nízká. Tato skutečnost vyvolává na jedné straně potřebu konstrukčního a provozního zajištění výměn poškozených elektroohříváků v mezikampaňových odstávkách a na druhé straně i instalaci záložních elektroohříváků na parním kompenzátoru objemu. Energetickou nevýhodou tohoto odporového elektroohřevu je skutečnost, že jeho plný příkon je kryt finální vysokopotenciální formou energie, tj. energií elektrickou, která je právě v těchto elektrárnách vyráběna s nižší účinností v termodynamickém cyklu sekundárního okruhu, než je účinnost dosahovaná v klasických tepelných elektrárnách.

Výše uvedené nevýhody jsou odstraněny nebo podstatně zmenšeny při realizaci a provozu řízení pro zvyšování a udržování tlaku teplotního média v primárním okru-

hu jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem podle tohoto vynálezu, který spočívá v tom, že zařízení sestává z otevřeného s primárním okruhem integrovaného tepelně čerpadlového okruhu, tj. z parního kompenzátoru objemu s vestavěným rozdělovačem páry, z kompresoru, z expandéru, v redukčního ventilu, z pomocného čerpadla, z vodního potrubí a z parního potrubí, kde prostřednictvím vodního potrubí je propojen přes redukční ventil primární okruh se vstupem expandéru a výstup vody z expandéru se sáním pomocného čerpadla a také výtlak pomocného čerpadla s primárním okruhem, zatímco parní potrubí propojuje výstup páry z expandéru se sáním kompresoru a výtlak kompresoru s rozdělovačem páry, přičemž zdrojem nížpotenciálního tepla je přímo primární okruh, respektive reaktor.

Technický pokrok v tomto oboru jaderné energetiky lze charakterizovat těmito hlavními výhodami, které poskytuje předmětné chráněné zařízení. Energeticky je tepelně čerpadlový ohřev a var vody v parních kompenzátorech objemu atraktivní vzhledem k dobrým relacím mezi spodními a horními i nejvyššími teplotami teplotnosného média existujícími za provozu v příslušných místech primárních okruhů dnešních jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Proto je reálné dosáhnout podstatné zmenšení elektrického příkonu i značné snížení spotřeby elektrické energie pro zajištění funkce parních kompenzátorů objemu. Za druhé, odpadá entropická ztráta při sdílení tepla za vysokého rozdílu teplot, která existuje při dosavadním elektrickém ohřevu a varu vody v parních kompenzátorech objemu. Za třetí, u otevřeného tepelně čerpadlového okruhu lze do vodního potrubí mezi expandérem a pomocným čerpadlem umístit celou čisticí stanici teplotnosného média primárního okruhu, čímž se tato stanice stane nízkotlakou stanicí. Lze předpokládat i určité zvýšení účinnosti u nízkotlaké čisticí stanice vlivem funkce předřazeného expandéru. Za čtvrté, podstatně se zjednoduší konstrukce a tím i výroba vysokotlaké nádoby parního kompenzátoru objemu, neboť odpadne převážná většina z celkového počtu hrdel na této nádobě umístěných. Za páté, při využití současně navrhované změny geometrického tvaru vysokotlaké nádoby parního kompenzátoru objemu, tj. při přechodu z válcového tvaru na tvar kulový, se podstatně zmenší hmotnost parního kompenzátoru objemu, čímž dojde ke značné úspoře vysoce kvalitního konstrukčního materiálu. Za šesté, při vytváření a udržování parního polštáře v parním kompenzátoru objemu přímo přehřátou vodní párou dodávanou kompresorem otevřeného tepelně čerpadlového okruhu lze zvětšit rychlost vzrůstání tlaku v primárním okruhu, což je účelné při energetickém spouštění jaderného zdroje páry. K výše uvedeným výhodám nutno při-

pojit i zmínku o určité průvodní nevýhodě chráněného zařízení, kterou je odpovídající snížení pasivnosti funkce u těchto systémů zařízení, a to vlivem použití aktivních členů, jimiž jsou kompresor, redukční ventil a pomocné čerpadlo. Tato zařízení jsou určující z hlediska spolehlivosti celku, a proto sama musí být vysoce spolehlivá, anebo náležitě zálohovaná.

Na přiložených výkresech jsou principiální schéma chráněného integrovaného zařízení a odpovídající tepelný diagram, kde na obr. 1 je znázorněno zařízení otevřeného tepelně čerpadlového okruhu, který je integrován s primárním okruhem jaderné elektrárny, zatímco na obr. 2 je příslušný entropický (T-S) diagram objasňující funkci tohoto otevřeného tepelně čerpadlového okruhu. Na obr. 1 je znázorněna jedna z několika smyček primárního okruhu, který sestává z reaktoru 1 z parogenerátorů 2, z cirkulačních čerpadel 3 a z primárního potrubí 4, které okruhově propojuje v uvedeném pořadí tyto komponenty primárního okruhu, k jehož horké větvi je vždy připojen i parní kompenzátor 5 objemu. Dále je znázorněno zařízení pro zvyšování a udržování tlaku teplotnosného média v primárním okruhu jaderné elektrárny i jeho funkční vazby na primární okruh, se kterým je předmětné zařízení integrováno. Jde o tepelně čerpadlový okruh, který je vůči primárnímu okruhu otevřený, neboť používá stejné teplotnosné médium, tj. tlakovou vodu primárního okruhu. Novým zařízením jsou rozdělovač 13 páry, umístěný v parním kompenzátoru 5 objemu, jímž je zakončeno parní potrubí 17, expandér 14 s předřazeným redukčním ventilem 9, dále za expandérem 14 v parním potrubí 17 umístěný kompresor 8, jakož i ve vodním potrubí 16 instalované pomocné čerpadlo 15. Armatura 18 ve vodním potrubí 16 poskytuje možnost zapojení čisticí stanice 23 v nízkotlaké části vodního potrubí 16, které jako celek propojuje horkou a studenou větev, respektive část primárního okruhu. Ke stávajícímu sprchovému potrubí 19, zakončenému sprchou 20 v horní části parního kompenzátoru 5 objemu, je čárkovane znázorněna variantní trasa sprchového potrubí 19 vycházející z výtlaku pomocného čerpadla 15. Posledním členem znázorněného souboru zařízení je najížděcí zdroj 24 tepla, který je nakreslen jako trubkový výměník tepla uvnitř expandéru 14. Parogenerátor 2 má připojeno napájecí potrubí 21 a parovod 22. Funkce primárního okruhu je všeobecně známa z odborné literatury, takže je zbytečné ji uvádět. Stačí jen poznamenat, že z provozních důvodů je nezbytné vytvořit a udržovat v nejvyšším místě primárního okruhu, jímž je vnitřní prostor parního kompenzátoru 5 objemu, vysokotlaký stav sytosti s dostatečně velkým parním polštářem. Funkce dalšího zařízení uvedeného na obr. 1 je následující.

Horká vysokotlaká voda odebíraná z horké větve primárního potrubí 4, nebo ještě účelněji z nejvyššího místa v reaktoru 1, jak naznačeno čárkovaně, přitéká vodním potrubím 16 k redukčnímu ventilu 9, ze kterého po snížení tlaku proudí dvoufázová směs vody a páry do expandéru 14. Po separaci fází v expandéru 14 proudí pára parním potrubím 17 nejprve ke kompresoru 8, ve kterém získá potřebné stlačení a energii jak k dalšímu průtoku parním potrubím 17 a rozdělovačem 13 páry, tak k barbotáži ve vodním prostoru parního kompenzátoru 5 objemu. Kontaktní kondenzací této páry dochází současně k dohřátí a varu vody v parním kompenzátoru 5 objemu a k vytvoření nezbytného pružného parního polštáře. Z expandéru 14 současně odtéká několikanásobně větší množství vody vodním potrubím 16 k pomocnému čerpadlu 15, které vodě dodá energii pro průtok posledním úsekem vodního potrubí 16 a k návratu do primárního okruhu, v němž je za provozu vysoký tlak. Čárkovaně nakresleným sprchovým potrubím 19 lze vrácenou vodu, která bude při současném provozu čistící stanice 23 chladnější než voda ve studené větvi primárního okruhu, zavést do sprchy 20 za účelem intenzifikace sprchování parního polštáře při nutnosti snižování tlaku v primárním okruhu. Čárkovaným úsekem parního potrubí 17 se realizuje možnost přepouštění přebytku páry z výtlaku kompresoru 8 při eventuálních debilancích mezi množstvím páry a množstvím vody vystupujícím z expandéru 14 následkem spojení provozu chráněného zařízení s provozem nízkotlaké čistící stanice 23. Je zřejmé, že přednostním regulačním členem umožňujícím získat potřebný poměr mezi množstvím vody a množstvím páry uvolňované v expandéru 14 je redukční ventil 9, jehož poloha souvisí s tlakem v expandéru 14, tj. s tlakem, na který se vysokotlaká voda z horké větve primárního okruhu škrtí. Zbývá poznamenat, že pouhým přemístěním rozdělovače 13 páry do parního prostoru parního kompenzátoru 5 objemu je možné podstatně rychleji vyvolat zvyšování tlaku v celém primárním okruhu, a to pomocí přehřáté páry zavedené z výtlaku kompresoru 8 přímo do parního prostoru kompenzátoru 5 objemu, neboť se neuplatní tepelná setrvačnost vody dohřívané při barbotáži k bodu varu. Příslušná termokinetická soustava přehřáté páry, nedohřáté vody a konstrukčního materiálu je zde ale nerovnovážná, čímž vznikají a existují nehomogenity teplotního pole ve stěně parního kompenzátoru 5 objemu. Redukovat odpovídající méně příznivé tepelné napjatostní poměry jde cestou minimalizace síly stěny u parního kompenzátoru 5 objemu, a to především změnou jeho stávající geometrie, tj. přechodem z válcového na kulový tvar jeho tlakové nádoby. Funkci horního, respektive přídatného rozdělovače 13 páry umístěného v parním prostoru spo-

lehlivě nahradí stávající sprcha 20, do jejíhož vstupu, respektive do koncového úseku sprchového potrubí 19 se zapojí odbočka z parního potrubí 17, která je znázorněna tečkovaně. Tyto úpravy zvýší provozní pružnost primárního okruhu a tím manévrovatelnost celé jaderné elektrárny. Na obr. 2 je tepelný entropický (T-S) diagram vody a vodní páry, v němž je znázorněn Rankinův pracovní cyklus chráněného zařízení, jehož principiální schéma je na obr. 1. V diagramu na obr. 2 značí: K kritický bod, $X = 0$ spodní mezní křivku, $X = 1$ horní mezní křivku, T teplotu, S entropii, P tlak. Bod A ukazuje stav teplotního média, tj. stav tlakové vody v horké větvi primárního okruhu, bod B je na spodní mezní křivce a je dán teplotou tlakové vody v horké větvi primárního okruhu, bod C udává stav dvoufázové směsi vody a vodní páry za redukčním ventilem, respektive v expandéru. Bod D ukazuje stav syté páry nasávané kompresorem a bod E, který už je v oblasti přehřáté páry, ukazuje stav páry za kompresorem, tj. stav páry dodávané do parního kompenzátoru objemu. Bod F zobrazuje páru tvořící parní polštář v parním kompenzátoru objemu a bod G zobrazuje stav vroucí vody v témž parním kompenzátoru objemu. Čára A—B—C odpovídá isoentaltickému škrcení tlakové vody v redukčním ventilu, úsečka D—E znázorňuje adiabatické stlačení páry v kompresoru a linie E—F—G ukazuje isobarické ochlazení a kondenzaci páry vtlačené do parního kompenzátoru objemu.

Pro konkrétní příklady aplikace vynálezu byly použity parametry čs. jaderné elektrárny se dvěma vodovodními reaktory o tepelném výkonu 2×1375 MW, kde tlak a teploty vody obíhající v primárním okruhu jsou přibližně 12,5 MPa a 297/268 °C, přičemž v parním kompenzátoru objemu je stav sytosti, tj. teplota syté páry a vroucí vody je 325 °C. Pokud jde o otevřený tepelně čerpadlový okruh, byl proveden orientační výpočet adiabatického výkonu kompresoru, skutečného výkonu pomocného čerpadla a tepelného, respektive topného výkonu zavedeného do parního kompenzátoru objemu. Při využití 11,111 kg/s (tj. 40 t/h — což odpovídá výkonu čistící stanice) vody z horké větve primárního okruhu a při jejím seškrcení na tlak 5 MPa se za redukčním ventilem vytvoří dvoufázová směs o suchosti $X = 0,115$, z níž se v expandéru odseparuje 1,278 kg/s syté páry a 9,833 kg/s horké vody. Po adiabatickém stlačení této páry na tlak 12,5 MPa se formou přehřívacího a kondenzačního tepla v páře dodá do parního kompenzátoru objemu tepelný výkon 1890 kW. Přitom adiabatický výkon kompresoru činí 238 kW a skutečný výkon pomocného čerpadla při odhadnuté účinnosti čerpadla 0,72 činí přibližně 100 kW. Poměr součtu výkonů obou strojů k topnému výkonu v parním kompenzátoru objemu

činí okolo 18 %, což ukazuje energetickou výhodnost chráněného zařízení. Nutno poznamenat, že pro vyšší parametry jaderného energetického bloku další generace, jehož elektrický výkon je 1000 MW, vychází efektivnost předmětného zařízení ještě o něco vyšší, a to se zatím neuvažovala alternativní možnost parního pohonu zejména u kompresoru páry. Pokud jde o přechod z válcového tvaru na kulový tvar u parního kompenzátoru objemu, jehož vlastní celkový objem je 44 m³, vnitřní průměr válcové části je 2880 mm a základní síla stěny válcové části je 160 mm, ukazuje se, po triviálním přepočtu, možnost snížení hmotnosti vlivem změny geometrie kompenzátoru zhruba o 40 %, což je přitažlivé vzhledem k vysoké kvalitě a tím i ceně příslušné oceli. U kulového parního kompenzátoru objemu o stejném vlastním celkovém objemu 44 m³, vychází vnitřní průměr 4380 mm a základní síla stěny 121,5 mm a tím větší průměr 4623 mm. Z hlediska transportu a montáže lze tento rozměr ještě akceptovat, neboť je menší než maximální průměr pří-

slušné reaktorové nádoby, který je 4710 mm. Výrobní technologii kulového parního kompenzátoru objemu lze odvodit z již osvojené výroby den a vík pro reaktorové nádoby. Je zřejmé, že navržená změna tvaru pro nové parní kompenzátory objemu je atraktivní i při ponechání dosavadního elektrického systému ohřevu a varu vody v těchto zařízeních, neboť vedle značné úspory materiálu budou kulové parní kompenzátory objemu vykazovat též lepší hydraulické a separační vlastnosti i menší ztráty tepla do okolí vlivem minimalizovaného vnějšího povrchu.

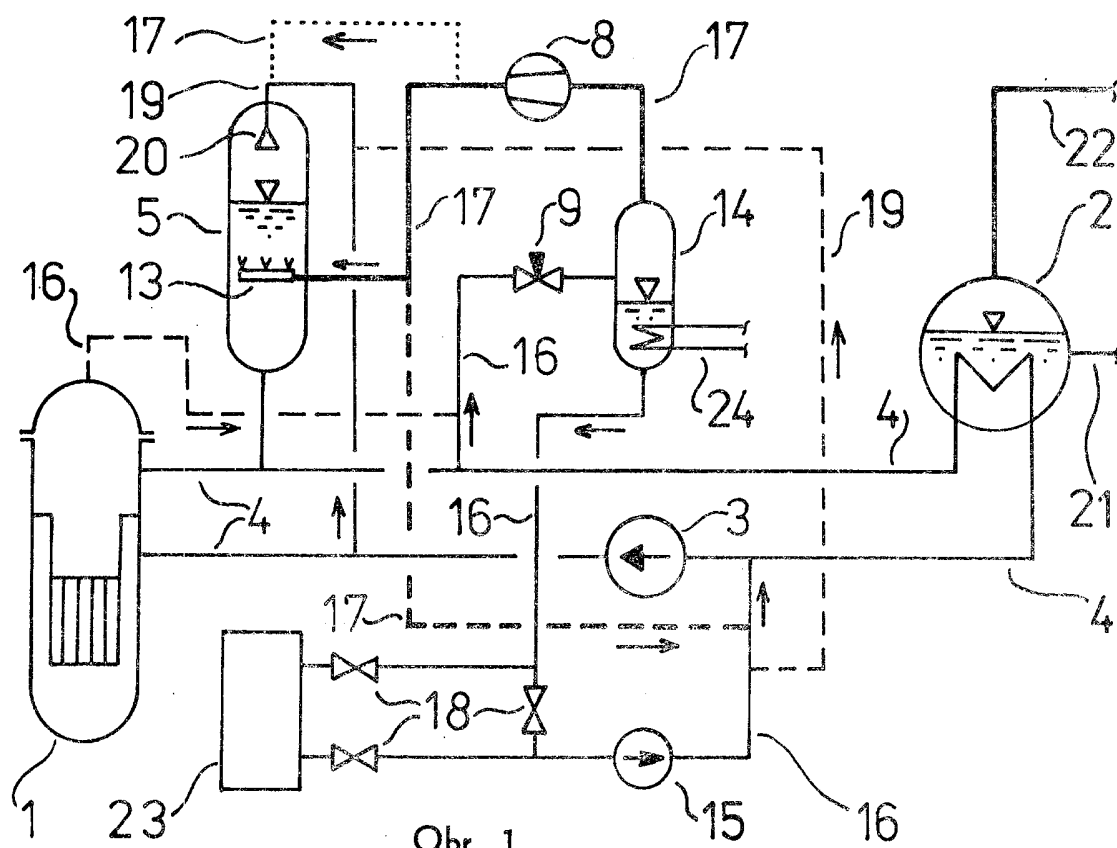
Závěrem lze konstatovat, že předmětný vynález se jeví cenným inovačním krokem ve vývojovém procesu u významného typu jaderných elektráren, které se stále více uplatňují v energetických programech mnoha zemí. Lze proto předpokládat, že po rozpracování, vývoji a provozním ověření nejdůležitějších komponent chráněného zařízení dojde zejména na bázi tvůrčí vědeckotechnické mezinárodní spolupráce k jeho relativně rychlému využití.

PŘEDMĚT VYNÁLEZU

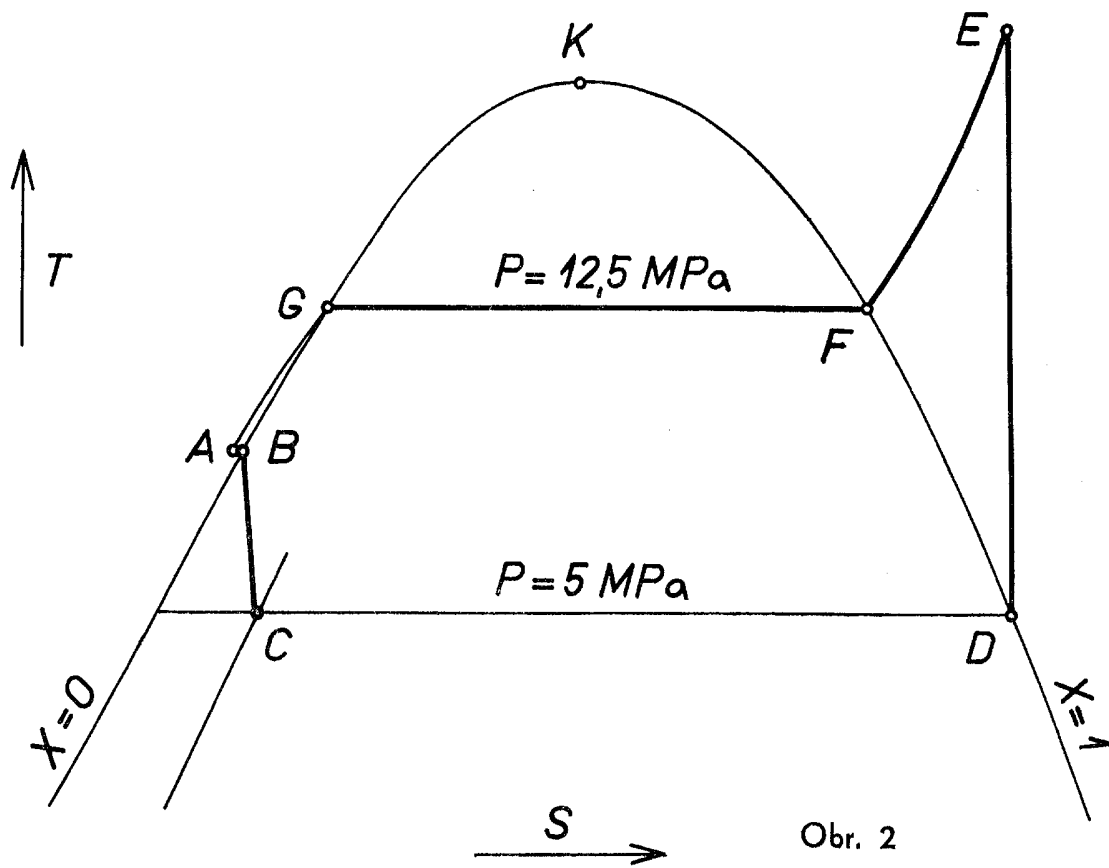
1. Integrované zařízení pro zvyšování a udržování tlaku teplotnosného média v primárním okruhu jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem, vyznačené tím, že sestává z otevřeného s primárním okruhem integrovaného tepelně čerpadlového okruhu, tj. z parního kompenzátoru (5) objemu s vestavěným rozdělovačem (13) páry, z kompresoru (8), z expandéru (14), z redukčního ventilu (9), z pomocného čerpadla (15), z vodního potrubí (16) a z parního potrubí (17), kde prostřednictvím vodního potrubí (16) je propojen přes redukční ventil (9) primární okruh se vstupem expandéru (14) a výstup vody z expandéru (14) se sáním

pomocného čerpadla (15) a také výtlačk pomocného čerpadla (15) s primárním okruhem, zatímco parní potrubí (17) propojuje výstup páry z expandéru (14) se sáním kompresoru (8) a výtlačk kompresoru (8) s rozdělovačem (13) páry, přičemž zdrojem nížepotenciálního tepla je přímo primární okruh, respektive reaktor (1).

2. Integrované zařízení podle bodu 1 vyznačené tím, že rozdělovač (13) páry je vytvořen ze stávající sprchy (20) umístěné nahoře v parním kompenzátoru (5) objemu, přičemž do jejího vstupu, respektive do konce sprchového potrubí (19) je zapojeno parní potrubí (17) z výtlačku kompresoru (8).



Obr. 1



Obr. 2