



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 112017013046-7 A2



(22) Data do Depósito: 16/11/2015

(43) Data da Publicação Nacional: 19/11/2019

(54) **Título:** SISTEMA DE CONFINAMENTO E RESFRIAMENTO DE MATERIAL FUNDIDO DE NÚCLEO DE REATOR NUCLEAR MODERADO POR ÁGUA E RESFRIADO A ÁGUA

(51) **Int. Cl.:** G21C 9/016; G21C 13/10.

(30) **Prioridade Unionista:** 16/12/2014 RU 2014150938.

(71) **Depositante(es):** JOINT STOCK COMPANY ATOMENERGOPROEKT.

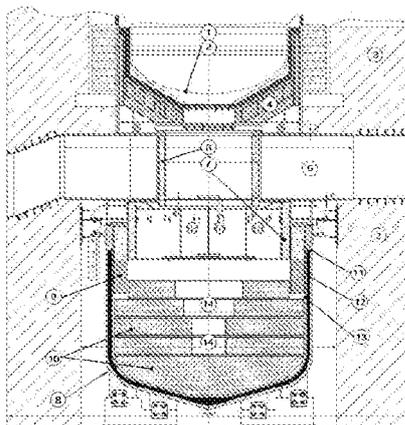
(72) **Inventor(es):** ANDREY BORISOVICH NEDOREZOV; ALEKSANDR STALEVICH SIDOROV.

(86) **Pedido PCT:** PCT RU2015000781 de 16/11/2015

(87) **Publicação PCT:** WO 2016/099326 de 23/06/2016

(85) **Data da Fase Nacional:** 16/06/2017

(57) **Resumo:** A invenção se refere à indústria de energia nuclear, a saber, a sistemas que fornecem segurança de usinas de energia nuclear (NPP), e podem ser usados durante acidentes graves que levam à falha do recipiente do reator e do confinamento de NPP. O sistema de confinamento e resfriamento de material fundido inclui uma placa de guia em formato de cone instalada sob o fundo do recipiente do reator, uma viga de cantiléver instalada sob a placa de guia e que sustenta a mesma, um coletor de núcleo instalado sob a viga de cantiléver e equipado com revestimento resfriado na forma de um recipiente de múltiplas camadas para proteção da parede externa de troca de calor contra impactos dinâmicos, térmicos e químicos, e material de carga para diluição de material fundido dentro do recipiente de múltiplas camadas. O dito recipiente de múltiplas camadas contém as camadas metálicas interna e externa com uma camada intermediária na forma de uma carga não metálica localizada entre as mesmas. As nervuras de mancal são instaladas entre as camadas interna e externa em um intervalo de azimute (Sintervalo) que atende ao seguinte critério: $\text{dext} / 15 \leq \text{Sintervalo} \leq \text{dext} / 5$, em que dext é o diâmetro externo do recipiente. O (...).



"SISTEMA DE CONFINAMENTO E RESFRIAMENTO DE MATERIAL FUNDIDO DE NÚCLEO DE REATOR NUCLEAR MODERADO POR ÁGUA E RESFRIADO A ÁGUA"

DESCRIÇÃO

[0001] A invenção refere-se à indústria de energia nuclear, a saber, a sistemas que fornecem segurança de usinas de energia nuclear (NPP) e podem ser usados durante acidentes graves que levam à falha do recipiente do reator e de seu confinamento.

[0002] Acidentes de fusão de núcleo que ocorrem em falhas múltiplas dos sistemas de resfriamento do núcleo constituem o maior risco de radiação.

[0003] Durante tais acidentes, o material fundido de núcleo, cório, funde os elementos internos do reator e o seu recipiente e flui para fora do recipiente do reator e, devido ao seu calor residual, pode afetar a integridade da contenção do NPP, a última barreira no caminho da liberação do produto radioativo para o ambiente.

[0004] Para evitar isso, o cório liberado deve ser confinado e resfriado continuamente até sua completa cristalização. Um sistema de confinamento e resfriamento de material fundido de núcleo de reator (cório) desempenha essa função, evita danos à contenção do NPP e, portanto, protege a população e o ambiente da exposição à radiação em caso de acidentes graves em reatores nucleares.

[0005] De acordo com os antecedentes da invenção, existe um dispositivo de resfriamento e confinamento de cório de reator nuclear localizado em uma cavidade de concreto sob o reator e que contém um recipiente resfriado a água, pelotas com um diluente de cório de óxido mancal de urânio que são ligados por argamassa de cimento e colocados em camadas horizontais de blocos de aço, o fundo do bloco inferior é de formato idêntico ao fundo do recipiente, os blocos acima têm um

furo central e as montagens que unem os blocos uns aos outros e ao recipiente estão localizados em entalhes de corte vertical dos blocos (consulte a Patente Número RU 2514419 datada de 27/04/2014).

[0006] O dito análogo tem várias desvantagens:

[0007] - o fundo do bloco inferior, de formato idêntico ao fundo do recipiente, não possui furo central enquanto os blocos acima o possuem, isto resulta em "bloqueio" de pelotas com diluente no bloco inferior em que a primeira porção de cório contém principalmente aço derretido e o zircônio entra. Ao considerar que o ângulo da inclinação inferior está entre 10 e 20 graus, o peso das pelotas "bloqueadas" com o diluente constitui 25 a 35% em peso total das pelotas no recipiente. As próximas porções de cório que contém principalmente óxidos de urânio e zircônio ocorrem de uma a três horas após a primeira porção e não podem fornecer condições para a reação química térmica com as pelotas no bloco inferior, pois o aço distribuído antes se solidificará no bloco inferior (assim evita a interação das pelotas com urânio e óxidos de zircônio) ou destrua a estrutura de aço e os elementos de fixação do bloco inferior (então todas as pelotas localizadas dentro flutuam e formam uma tampa de entulho acima do cório),

[0008] - uma fórmula para determinar o peso do diluente de cório de óxido que contém urânio não determina o limite mínimo do peso exigido de diluente corretamente devido à consideração incorreta da correlação entre a espessura das camadas de óxidos e metais do reator nuclear. O limite inferior sob esta fórmula deve ser aumentado em 35% no caso de pelotas bloqueadas no bloco inferior e 15% mais no caso de pelotas serem bloqueadas pelo aço fundido nos blocos superiores antes de a inversão das camadas de óxido e metal começar. Assim, o limite inferior para o

cálculo do peso do diluente deve ser multiplicado por um coeficiente de 1,5.

[0009] - o peso máximo da água residual em percentagem em peso no aglutinante de cimento para pelotas diluentes não excede 8%, o que não parece correto. De acordo com os resultados de experimentos (consulte "Investigation of conditions to provide bonding of sacrificial SFAO ceramic with colored mixture brick mortar"). Informações técnicas. O Ministério da Ciência e Educação da Federação Russa, Instituição Educacional Estadual de Formação Profissional Superior, Instituto Tecnológico do Estado de São Petersburgo (universidade técnica), 2013, [1], a ligação eficaz das pelotas fornece a operacionalidade que o projeto requer, a fração em peso de água quimicamente ligada deve ser de 10%, caso contrário, a integridade da configuração das pelotas e sua operacionalidade serão comprometidas. Uma tese sobre a diminuição do teor de água no aglutinante de cimento para diminuir a liberação de hidrogênio é incorreta devido à consideração incorreta da interação do vapor com a estrutura porosa da configuração das pelotas.

[0010] De acordo com os antecedentes da invenção, existe uma estrutura de parede de recipiente de trocador de calor projetada para dispositivos de resfriamento e de confinamento de cório que compreendem paredes internas e externas com material de carga cerâmica granulada que é quimicamente semelhante ao material sacrificial, com pelo menos 100 mm de espessura no meio (consulte a Patente do Modelo de Utilidade Russa Número. 100326, 10/12/2010).

[0011] Esta estrutura de recipiente tem as seguintes desvantagens:

[0012] - material cerâmico granulada não fornece proteção eficaz da parede externa do recipiente de

trocador de calor a partir do impacto térmico induzido por material fundido de alta temperatura, pois esse material é um isolador térmico eficaz com condutividade térmica inferior a $0,5 \text{ W / (m K)}$ em média e praticamente não transfere calor para a parede externa do recipiente até o final do processo de fundição, o que aumenta o risco de destruição do trocador de calor durante a lavagem por convecção de material granulado pelo material fundido de núcleo,

[0013] - o material cerâmico granulado não fornece proteção química confiável da parede externa do recipiente do trocador de calor, como no caso de a parede interna do trocador de calor ser destruída, esse material pode verter-se do espaço entre paredes verticais à taxa de descarga determinada pela área de destruição, tal processo irá esvaziar o espaço entre paredes e deixar a parede externa sem a proteção química e térmica necessária, por aumentar, assim, o risco de destruição do trocador de calor,

[0014] - grande (pelo menos 100 m) de largura do espaço entre as paredes externas e internas do trocador de calor durante a fusão do material cerâmico granulado (que contém óxidos de ferro e de alumínio) resulta em redistribuição significativa dos fluxos de calor, o fluxo de calor principal não passa através da parede externa do recipiente do trocador de calor, mas através da superfície livre desprotegida do espelho fundido que aumenta a temperatura média do cório no trocador de calor, desta forma causa os seguintes processos: aumento da geração de aerossóis, alta liberação de gases não condensantes, aumento da emissão térmica, aquecimento e destruição adicionais do equipamento localizado acima e, como resultado, cório que flui para fora da área resfriada, por levar à destruição do trocador de calor.

[0015] É por isso que a aplicação de aterros cerâmicos granulados sem uma forte conexão de condução de calor com a parede externa do trocador de calor é ineficaz.

[0016] O objetivo desta invenção é eliminar as deficiências de invenções similares.

[0017] O resultado técnico da invenção implica eficácia aumentada de remoção de calor de material fundido e confiabilidade estrutural aprimorada.

[0018] O dito resultado técnico é alcançado devido ao fato de que o sistema de resfriamento e confinamento de material fundido de núcleo do reator nuclear moderado por água e refrigerado a água contém uma placa de guia em formato de cone instalado sob o fundo do recipiente do reator, uma viga de cantiléver instalada sob a placa de guia e que suporta o mesmo, um coletor de núcleo instalado sob a viga de cantiléver e equipado com um revestimento resfriado sob a forma de um recipiente de várias camadas para proteção da parede externa de troca de calor de impactos dinâmicos, térmicos e químicos e material de carga para diluição de material fundido no interior de recipiente de múltiplas camadas, em que o recipiente contém camadas de metal externas e internas, com camada intermédia na forma de uma carga não metálica localizada no meio, e as nervuras de mancal são instaladas entre as camadas interna e externa em um intervalo de azimute ($S_{\text{intervalo}}$), ou seja, intervalo circular no plano central do recipiente de múltiplas camadas, que atenda ao seguinte critério:

[0019] $d_{\text{externo}}/15 < S_{\text{intervalo}} < d_{\text{externo}}/5$, em que $d_{\text{externo}}/15$ é o diâmetro externo do recipiente.

[0020] O resultado técnico acima é alcançado em opções específicas da invenção devido ao fato de que:

[0021] - nervuras de mancal são rigidamente protegidas na camada externa e não estão protegidas na camada interna,

[0022] - nervuras de mancal são rigidamente protegidas nas camadas externa e interna,

[0023] - nervuras de mancal são instaladas com folgas térmicas radiais e azimutais,

[0024] - a parte inferior do recipiente que liga a parte de cilindro superior com a parte de cone inferior contém um composto toroidal de três camadas que garante, por um lado, uma transição hidrodinâmica suave do cone para a parte do cilindro do recipiente e, por outro lado, garante a expansão térmica da camada interna independentemente da camada externa,

[0025] - o recipiente contém uma camada adicional resistente à corrosão de 0,1 a 0,5 mm de espessura aplicada na camada externa,

[0026] - o recipiente contém uma camada adicional de 0,5 a 5 mm de espessura que aumenta a transferência de calor por convecção para a água aplicada na camada externa.

[0027] Em comparação com os análogos, o sistema em consideração inclui um coletor de núcleo com um revestimento de três camadas com paredes de metal externas (exterior) e internas e uma carga e com nervuras de mancal instaladas entre as paredes externas e internas em um intervalo de azimute ($S_{\text{intervalo}}$), ou seja, intervalo circular no plano central do recipiente de múltiplas camadas, que atende ao seguinte critério: $d_{\text{externo}}/15 < S_{\text{intervalo}} < d_{\text{externo}}/5$,

[0028] em que d_{externo} é o diâmetro externo do recipiente (m).

[0029] A correlação de parâmetro especificada fornece um ajuste adequado da instalação das nervuras de mancal, sujeito ao diâmetro externo do recipiente que pode variar de 3 a 12 m, com o menor valor do quociente selecionado para diâmetros maiores e o maior selecionado para diâmetros menores. Em outras palavras, se o diâmetro

externo do recipiente é de 12 m, o quociente da divisão por 15 é selecionado, e se for 3 m, o quociente da divisão por 5 é selecionado, nesse caso, o intervalo de disposição das nervuras no plano azimutal (plano central) será aproximadamente de 0,4 a 0,8 m.

[0030] A invenção é ilustrada com desenhos, em que:

[0031] A Figura 1 mostra o projeto esquemático do sistema de confinamento e resfriamento de cório e

[0032] A Figura 2 mostra o projeto do recipiente de camada múltipla de coletor de cório.

[0033] Designação de elementos estruturais nos desenhos:

[0034] 1 - recipiente de reator,

[0035] 2 - fundo de recipiente de reator,

[0036] 3 - abóbada de concreto (cavidade de reator),

[0037] 4 - placa de guia,

[0038] 5 - viga de cantiléver,

[0039] 6 - proteção térmica de viga de cantiléver,

[0040] 7 - piso operacional,

[0041] 8 - coletor de núcleo,

[0042] 9 - proteção térmica de flange de recipiente de múltiplas camadas,

[0043] 10 - carga,

[0044] 11 - camada externa de recipiente de múltiplas camadas,

[0045] 12 - carga de recipiente de múltiplas camadas,

[0046] 13 - camada interna do recipiente de múltiplas camadas,

[0047] 14 - reservatório graduado cônico ou cilíndrico para cório,

[0048] 15 - nervura de mancal,
[0049] 16 - parte do cilindro do recipiente,
[0050] 17 - parte de cone do recipiente,
[0051] 18 - invólucro toroidal de três camadas.

[0052] De acordo com a invenção reivindicada, uma placa de guia em formato de cone (4) suportada por uma viga de cantiléver (5) com proteção térmica (6) é instalada sob o fundo (2) do recipiente do reator (1) localizado em uma abóbada de concreto (3).

[0053] Sob a viga em cantiléver (5), existe um coletor de núcleo (8) com um revestimento refrigerado (recipiente) na forma de um recipiente de múltiplas camadas que contém camadas metálicas externas (11) e internas (13) (paredes) com uma carga não metálica (12) no meio. Dentro do coletor de núcleo (8), existe uma carga sacrificial (10) aplicada ao cório diluído. Além disso, a carga (11) é equipada com um reservatório graduado cônico ou cilíndrico (14) para acomodação de cório.

[0054] Além disso, o recipiente de coletor de núcleo (8) é dotado de proteção térmica (9) de um flange de recipiente de múltiplas camadas.

[0055] Um piso operacional (7) está localizado no espaço entre a viga de cantiléver (5) e o coletor (8).

[0056] A placa de guia (4) é projetada para guiar o cório (material fundido de núcleo) após a destruição do recipiente do reator ou de fusão atravessante para o coletor (8). Além disso, a placa de guia (4) evita que grandes fragmentos de interior do recipiente, conjuntos de combustível e fundo de recipiente de reator caiam no coletor e protejam a viga de cantiléver (5) e suas linhas de comunicação no caso de o cório do recipiente de reator (1) entrar no coletor (8). A placa de guia (4) também protege a abóbada de concreto (3) do contato direto com o

material fundido de núcleo. A placa de guia (4) é dividida por nervuras de resistência em seções para fluxo de para baixo de material fundido de núcleo. As nervuras de resistência restringem o fundo do recipiente do reator (2), sendo que o material fundido evita que o fundo cubra os furos das seções da placa de guia (4) e bloqueia o fluxo para baixo de material fundido em caso de sua destruição ou deformação plástica severa. Sob a superfície do cone da placa de guia, existem duas camadas de concreto: uma camada de concreto sacrificial (base de óxido de ferro e de alumínio) diretamente sob a superfície e uma camada de concreto resistente ao calor termoestável (base de óxido de alumínio) sob o concreto sacrificial. À medida que o concreto sacrificial está sendo diluído no material fundido, isso aumenta a área livre nas seções da placa de guia em caso de bloqueio (quando o cório é solidificado em um ou vários setores), o que permite evitar o superaquecimento e a destruição das nervuras de resistência, isto é, o bloqueio completo da área limpa e, posteriormente, destruição da placa de guia. O concreto termo resistente ao calor fornece força à estrutura quando diminui a espessura do concreto sacrificial. Esse concreto protege o equipamento de subcamada do impacto do cório evita que o último funda ou destrua a placa de guia (4).

[0057] A viga de cantiléver (5) protege não só o coletor (8), mas também as linhas de comunicação interna de todo sistema de confinamento e resfriamento de cório da destruição por cório e serve como suporte para a placa de guia (4) que transfere impactos de estatística e de dinâmica na viga de cantiléver (5) fixada ao recipiente do reator (3). A viga de cantiléver (5) garante também a operabilidade da placa de guia (4) no caso de sua destruição em corte quando a capacidade de mancal das nervuras é comprometida.

[0058] A viga de cantiléver (5) compreende:

[0059] - canos de cobertura que conectam os sensores de instrumentação e controle (I & C),

[0060] - linhas de pulverização de cório (um cabeçote com encaamentos de distribuição) que conectam o abastecimento de água de resfriamento de fontes externas, a água de resfriamento é fornecida pelas linhas de pulverização a serem pulverizadas no cório da viga cantiléver acima,

[0061] - linhas de remoção de vapor que removem o vapor da abóbada de concreto (3) sob o reator para a área pressurizada quando o cório é resfriado no coletor do núcleo (8), as linhas removem o vapor saturado sem exceder a pressão permitida na abóbada de concreto (3),

[0062] - linhas de abastecimento de ar que abastecem ar para refrigeração de placa de guia (4) durante a operação normal.

[0063] O coletor (8) confina e esfria o material fundido de núcleo sob o reator na cavidade do reator (3) no caso de o recipiente do reator (1) ser fundido de modo atravessante ou destruído por meio de uma superfície de troca de calor evoluída e transferência de calor para grandes volumes de água fervente. O coletor (8) está instalado na fundação da cavidade do reator (3) em partes embutidas.

[0064] De acordo com a invenção reivindicada, o revestimento do coletor (8) é um recipiente de múltiplas camadas que compreende:

[0065] - uma camada externa de metal (11): revestimento externo formado pela parede e o fundo,

[0066] - camada de carga não metálica (12),

[0067] - uma camada interna de metal (13): revestimento interno formado pela parede e o fundo.

[0068] A camada externa (11) pode ser

produzida a partir de aço, como série 22K, 20K, com espessura de parede de 10 a 70 mm e espessura inferior de 70 a 120 mm.

[0069] A camada interna (13) pode ser produzida a partir de aço, como a série 22K, 20K 09G2S, com espessura de parede de 15 a 40 mm e espessura inferior de 20 a 40 mm.

[0070] A camada de carga (12) pode ser produzida a partir de material alto ou mal condutor de calor.

[0071] O material com temperatura de fusão de 300 a 800 °C pode ser utilizado como um material de carga altamente condutor de calor, de preferência, de concreto de baixo ponto de fusão com máxima temperatura de fusão e espessura não superior a 600 °C e 70 a 150 mm consequentemente.

[0072] O material com temperatura de fusão acima de 800 °C pode ser usado como um material de carga mal condutora de calor, particularmente aterros de concreto ou de cerâmica.

[0073] As nervuras de mancal (15) são instaladas entre a camada interna (13) e a externa (11) (consulte a Figura 3) em um intervalo de azimute ($S_{\text{intervalo}}$) que atende ao seguinte critério:

$$[0074] \quad d_{\text{externo}} / 15 < S_{\text{intervalo}} < d_{\text{externo}} / 5,$$

[0075] em que d_{externo} 15 é o diâmetro externo do recipiente.

[0076] O intervalo de azimute ($S_{\text{intervalo}}$) é um intervalo ao redor do diâmetro externo da circunferência no plano central do recipiente de múltiplas camadas (em seção transversal), isto é, distância entre as interseções das nervuras de mancal com a parede externa (camada externa) do recipiente (consulte a Figura 3).

[0077] As nervuras de mancal indicadas (15)

são protegidas rigidamente à camada externa (11) e podem ser protegidas na camada interna (12).

[0078] Em particular, as nervuras de mancal podem ser produzidas a partir de aço 22 K e ter espessura de 10 a 60 mm e intervalo de disposição de azimute de 200 a 800 mm.

[0079] A parte inferior do recipiente (Figura 2) que liga a parte de cilindro superior (16) com a parte de cone inferior (17) contém um composto toroidal adicional de três camadas (18) que garante, por um lado, uma transição hidrodinâmica suave do cone para a parte do cilindro do recipiente e, por outro lado, garante a expansão térmica da camada interna independentemente da camada externa,

[0080] O recipiente de múltiplas camadas do coletor (8) pode conter uma camada resistente à corrosão adicional de 0,1 a 0,5 mm de espessura aplicada na camada externa,

[0081] Além disso, o recipiente pode conter uma camada adicional de 0,5 a 5 mm de espessura adicional que aumenta a transferência de calor por convecção para a água aplicada na superfície externa da camada externa.

[0082] A parte superior do coletor (8) do recipiente de múltiplas camadas está equipada com um flange, seus diâmetros interno e externo correspondem às paredes internas e externas do recipiente conseqüentemente.

[0083] A carga (10) fornece distribuição volumétrica de cório no interior do coletor de núcleo (8). É projetado para oxidação e dissolução de cório para reduzir a liberação de energia volumétrica e aumentar a superfície de troca de calor entre o cório emissor de energia e a camada externa de recipientes de múltiplas camadas (11), bem como contribui também para a criação de afecções para frações de cório que contém combustível para

flutuar acima da camada de aço. A carga (10) pode ser produzida a partir de componentes de aço e óxido que contém óxidos de ferro, alumínio e zircônio, com canais para distribuição de cório não apenas na peça do cilindro, mas também na cavidade do cone inferior.

[0084] O piso operacional (7) fornece proteção contra calor da parte superior do coletor (8) permitindo realizar a inspeção visual do recipiente do reator (1) durante a manutenção preventiva programada por fornecer acesso a:

[0085] - a carga (10) para revisão e remoção de água em caso de acidentes de vazamento,

[0086] - os conjuntos pressurizados que protegem a carga (10) de acidentes de vazamento,

[0087] - o sensor de I & C cobre os encaixes da extremidade do cano para reparos ou substituição do sensor.

[0088] O sistema reivindicado opera conforme a seguir:

[0089] No momento da destruição do recipiente (1), o material fundido de núcleo impactado por pressões hidrostáticas e excessivas começa a se mover para a superfície da placa de guia (4) suportada na viga em consola (5).

[0090] À medida que o núcleo flui para baixo através das seções da placa de guia (4), entra no recipiente de múltiplas camadas do coletor (8) e contata com a carga (10).

[0091] No caso do fluxo de cório assimétrico em corte, as proteções térmicas (6) da viga de cantiléver (5) e o piso de operação (7) começam a fundir. Ao serem destruídas, as proteções térmicas diminuem o impacto térmico do cório nos equipamentos protegidos, enquanto diminuem a temperatura e a reatividade química do próprio

cório.

[0092] Primeiro, o cório preenche o reservatório (14), então, à medida que os outros componentes da estrutura de aço da carga (10) são fundidos, ele preenche os vazios entre os componentes não metálicos da carga (10). Os componentes não metálicos do material da carga (10) estão interligados com um cimento especial que fornece o cozimento desses componentes não metálicos em conjunto em uma estrutura que previne que os componentes da carga (10) flutuem no material fundido de núcleo mais pesado. Na medida que os componentes não metálicos são cozidos em conjunto, o ajuste tem uma força suficiente quando os fixadores de aço da carga (10) perdem a força. Assim, a diminuição da força do componente de aço do material da carga (10) durante o aumento da temperatura é compensada pelo aumento da resistência do componente não metálico de ajuste do material da carga (10) durante a cozimento. Depois dos componentes de aço da carga (10) serem fundidos e dissolvidos, inicia-se a interação de superfície dos componentes não metálicos da carga (10) com os componentes de material fundido de núcleo. As propriedades físicas e químicas do projeto de carga são selecionadas para fornecer a máxima eficácia de dissolução de carga no material fundido de núcleo, evitar o aumento da temperatura do cório, diminuir a geração de aerossóis e a transferência de calor radiativa do espelho fundido, diminuir a geração de hidrogênio e outros gases não condensantes. Um dos componentes de carga é o óxido férrico com vários graus de oxidação que oxida o zircônio, oxida completamente o urânio e os dióxidos de plutônio no decurso de sua interação com o material fundido de núcleo, evitando, portanto, sua fase metálica e assegura a oxidação total de outros componentes de cório, o que permite evitar a radiólise do vapor de água e bloquear a absorção de

oxigênio da atmosfera sobre a superfície de espelho fundido. Isso leva adicionalmente a uma redução significativa da emissão de hidrogênio. O óxido férrico libera oxigênio durante esse processo e pode desoxidar até o ferro metálico inclusive.

[0093] A fusão de núcleo é descarregada dentro da carga (10) em duas fases: na primeira fase, principalmente o aço fundido e o zircônio com uma mistura de óxidos do recipiente do reator (1) estão fluindo para a carga (10), na segunda fase, os principais componentes dematerial fundido de núcleo que se deslocam para a carga são óxidos de fusão líquida com uma mistura de metais. Ao considerar isso, existem dois tipos diferentes de interação entre o material fundido de núcleo e a carga (10): 1) os componentes metálicos do material fundido de núcleo interagem com os componentes de carga e fundem os mesmos, pois o zircônio metálico fluído do material fundido de núcleo é oxidado no curso da interação do limite com os componentes de carga não metálicos que flutuam após a fusão e formam uma camada de ferro leve e óxidos de zircônio acima da camada de metais fundidos, 2) os componentes de óxido do material fundido de núcleo interagem tanto com estruturas metálicas como com componentes de carga não metálicos, fundindo e dissolvendo os mesmos, enquanto o zircônio, o cromo e alguns outros metais fundidos incluídos na fração de óxido do material fundido de núcleo são oxidados durante a interação com os componentes de carga não metálicos. Essa interação multifásica complicada resulta em oxidação adicional da fração de óxido do material fundido e oxidação dos componentes mais ativos da fração de metal do material fundido, geração de cório com propriedades predefinidas que permitem restringi-lo em um volume restrito e realizar seu seguro e eficiente resfriamento de longo prazo.

[0094] A interação do cório com a carga (10) resulta em diminuição da temperatura do cório gerada aproximadamente 1,5 a 2 vezes, o que permite diminuir o fluxo de calor radiativo do espelho fundido para a viga de cantiléver, a placa de guia e o fundo de recipiente do reator acima desse último significativamente. Para diminuir o fluxo de calor radiativo do espelho fundido e da geração de aerossóis de forma mais eficaz, utilizam-se tampas de entulho naturais e artificiais formadas tanto durante a fusão de concretos de propósito especial sob a emissão de calor do espelho fundido quanto durante a interação de material fundido de cório com a carga. A espessura e o tempo de vida da tampa de entulho são selecionados para minimizar o impacto do espelho fundido no equipamento localizado acima no pior caso do período inicial de confinamento de cório: durante a entrada na carga (10) e acumulação no coletor de núcleo (8). O tempo de entrada de material fundido de núcleo no coletor pode atingir até várias horas, enquanto a entrada da fase de óxido é significativamente desigual e pode ser seguida por uma mudança considerável ou término temporário do fluxo.

[0095] As reações químicas da carga (10) e o material fundido do núcleo mudam gradualmente a composição e a estrutura do cório. Na fase inicial, o material fundido de núcleo pode mudar de homogeneidade de estrutura de duas camadas: em geral, mistura de aço fundido e zircônio na parte superior, com material fundido de óxidos de alta fusão misturados com metais no fundo, a densidade de material fundido de óxido de alto fusão está ligada em média de 25% superior à densidade da mistura de metal fundido. Gradualmente, à medida que a carga foi dissolvida nos óxidos de fluido de material fundido de núcleo, a composição de cório, particularmente a sua fração de óxido, é alterada: a diminuição da densidade de óxido fluido é

mais intensiva do que a mudança de densidade de metais fundidos. Esse processo leva a uma diminuição contínua da diferença de densidade entre o metal fluido e as frações de óxido do cório. O peso inicial de materiais sacrificiais não metálicos no material de carga é selecionado de modo a garantir a dissolução de materiais sacrificiais não metálicos nos óxidos de alta fusão de fluidos de núcleo em quantidade tal que a densidade resultante do novo material fundido de óxido seja menor que a densidade da fração de metal fundido de cório. Quando a densidade de óxido fluido se torna menor que a densidade do metal fundido, ocorre inversão na piscina fundida de cório: óxidos fluidos flutuam e a fração de metal fundido do cório desce. A nova estrutura de cório permite a realização segura de resfriamento de espelho fundido. Quando os óxidos fluidos chegam à superfície, a água de refrigeração não cria risco de explosão de vapor devido a propriedades físicas térmicas de óxidos fluidos e não entra em reações químicas que geram hidrogênio, não está sujeita à decomposição térmica devido a uma temperatura de espelho fundido relativamente baixa. A inversão de óxidos e metais fluidos permite fornecer um fluxo de calor mais estável através do coletor de recipiente de múltiplas camadas para o último dissipador de calor, água, que é causada por várias propriedades físicas térmicas de óxidos fluidos e metais fundidos.

[0096] O calor é transferido do cório para o coletor (8) em três fases. Na primeira fase, principalmente quando os metais fundidos fluem para dentro do reservatório (14) da carga (10), a troca de calor entre o coletor (8) de recipiente de múltiplas camadas (11 a 13) e o material fundido não é particularmente intensivo: o calor acumulado pelo material fundido é gasto principalmente no aquecimento e derretimento parcial de componentes estruturais da carga (10). A parte inferior do coletor (8) é aquecida

uniformemente e não tem características significativas. Ao considerar que o fundo do cone do coletor (8) é, em média, 30% mais espesso do que a sua parte cilíndrica, e a transferência de calor convectiva vertical de cima para baixo é consideravelmente menos efetiva do que a transferência de calor convectiva radial ou a transferência de calor convectiva vertical de baixo para cima, o coletor (8) do fundo do processo de aquecimento é significativamente mais lento do que o aquecimento subsequente da sua parte cilíndrica.

[0097] Na segunda fase, quando os óxidos fluídos de alta fusão dominam, o nível de material fundido do cório aumenta significativamente (considerar a dissolução dos materiais de carga). A fração de óxido de cório é emissora de energia. A emissão de energia é distribuída entre as frações de óxido e cório metálico em frações de aproximadamente 9 a 1, o que leva os consideráveis fluxos de calor da fração de óxido de cório. Como a densidade da fração de óxido de cório na fase inicial de interação com a carga é significativamente maior do que a densidade de componentes de metal fundido, estratificação e redistribuição de cório torna-se possível: metais fundidos nos óxidos superiores e de alta fusão no fundo. Nessa condição, quando o fundo do coletor (8) não é afetado significativamente por óxidos de alta fusão porque a transferência de calor convectiva é direcionada de cima para baixo e a condutividade de calor da crosta de óxido na fronteira da "parede/óxidos do recipiente" é insignificante e, em média, não excede 1 W/(m K). A crosta de óxido que consiste em óxidos fundidos de alta fusão (linha de entulho) é formada como resultado do resfriamento de material fundido de óxido no limite "óxidos/metálico", pois o metal tem uma maior potência do que os óxidos e pode fornecer uma melhor transferência de calor para o último

dissipador de calor, a água. Esse efeito é usado para confinamento de cório confiável que permite evitar a interação química dos componentes do cório com a camada externa do recipiente de múltiplas camadas refrigerado a água (11) e fornecer sua proteção térmica. Os metais fundidos acima dos óxidos fluidos recebem energia geralmente devido à transferência de calor convectiva com óxidos fluidos, a direção de transferência de calor é de baixo para cima. Esta condição pode levar ao superaquecimento da fração de metal fundido de cório e à distribuição significativamente desigual dos fluxos de calor através das camadas de recipientes de múltiplas camadas (11 a 13) do coletor (8) até o último dissipador de calor, enquanto aumenta a densidade do fluxo de calor por radiação do espelho fundido. Na área de interação do coletor (8) de recipiente de múltiplas camadas (11 a 13) e parte de metal líquido do cório, nenhuma camada de entulho, nem barreiras naturais causadas pelo superaquecimento de recipientes de múltiplas camadas são formadas. A tarefa em questão é resolvida por disposições de projeto.

[0098] Na terceira fase, o cório interage com o material de carga (10) à medida que se destaca na camada interna do recipiente de múltiplas camadas (13). Nesse momento, a camada externa do recipiente de múltiplas camadas (11) no lado da cavidade do reator (3) é preenchida com água. O coletor de núcleo (8) é instalado na cavidade do reator (3) e está conectado com a reservatório, de modo a coletar refrigerante de circuito primário de usina de reator durante os acidentes de projeto e além do projeto e a água abastecida no circuito primário a partir de sistemas de segurança. Para evitar a falha da camada externa do recipiente de múltiplas camadas (11) que transfere calor por material fundido de cório de alta temperatura, o coletor de núcleo (8) é projetado como um recipiente de

múltiplas camadas descrito acima. Nesse caso, é possível distribuir cargas térmicas e mecânicas entre as camadas (11 a 13) do recipiente de múltiplas camadas: os principais carregamentos térmicos são ocupados pela camada interna (13) e os principais carregamentos mecânicos (impacto e pressão) são ocupados pela camada externa (11). Os carregamentos mecânicos são transferidos da camada interna (13) para a camada externa (11) pelas nervuras de mancal instaladas na superfície interna da camada externa (11) com a camada interna (13) soldada a mesma. Esse projeto garante que a camada interna (13) transfira a tensão de deformação térmica através das nervuras para a camada externa resfriada (11). Para minimizar o estresse térmico no lado da camada interna (13), as nervuras são conectadas à camada externa (11) com o uso de amortecimento térmico.

[0099] Se a carga (12), produzida a partir de material altamente condutor de calor (concreto de baixa fusão) for usada, assegura-se a transferência de calor da camada interna do recipiente (13) para o externo (11). A camada interna (13) é aquecida pelo cório e o calor é transferido para a carga (12) (concreto de baixa fusão). Em primeiro lugar, durante a condução de calor, a carga é aquecida até a temperatura de fusão, então, à medida que a largura da área fundida aumenta, a transferência de calor convectiva entre a camada interna (13) e a carga não derretida (12) é iniciada. Esse processo é continuado até que a carga (12) seja completamente fundida com liberação de fluxo de calor da camada interna para a externa. O processo de fusão de carga (12) é bastante rápido devido à alta condutividade de calor do material, portanto, praticamente todo o fluxo de calor da camada interna do recipiente será absorvido pelo material de carga. Para esse fim, a espessura da carga é selecionada para atender aos dois critérios principais: 1) o tempo de fusão do concreto

deve ser significativamente menor do que o tempo do aquecimento crítico da camada interna do recipiente, que leva a perda de força; 2) esse nível de transferência de calor convectivo deve ser fornecido entre as camadas interna e externa que a densidade de fluxo de calor transferida da camada interna do recipiente para o concreto fundido diminui 1,5 a 2 vezes durante a transferência do concreto fundido para a camada externa (parede externa) devido à transferência de calor-massa convectiva no concreto fundido. O primeiro critério principal é cumprido devido ao projeto estrutural: seleção de macro porosidade de carga (10) para fornecer um fluxo de calor moderado para a camada interna do recipiente na fase inicial de interação do cório com a carga, o que permite fundir o concreto sem perda de força da camada interna do recipiente durante o aumento de temperatura. Tal macro porosidade permite excluir o impacto de todo o cório na superfície interna da camada interna do recipiente, limitando esse impacto aproximadamente a um décimo da liberação de energia total da liberação de energia residual e reações químicas com os componentes de carga (10) no cório durante um período de tempo restrito na fase inicial de interação. Na fase final da interação do material fundido de núcleo com a carga (10), a camada interna do recipiente é aquecida até a temperatura de projeto e o concreto fluido de baixa fusão fornece transferência de calor convectivo para a camada externa do recipiente e adicionalmente para o dissipador de calor final (água) na área de contato térmico do cório e da camada interna do recipiente. O segundo critério principal é cumprido devido às propriedades do concreto fluido de baixa fusão e aos parâmetros do espaço entre as camadas do recipiente, em que a transferência de calor e massa convectiva garante a diminuição predefinida da densidade do fluxo de calor durante a sua transferência da camada

interna para a externa.

[0100] Se a carga (12) produzida a partir de material mal condutor de calor for utilizado, assegura-se a manutenção do isolamento térmico da camada externa (11) do coletor (8) na fase inicial da entrada de material fundido do núcleo. O principal objetivo da carga (12) é proteger a camada externa (11) do coletor (8) do impacto térmico e formar uma camada de entulho na sua superfície interna. O cório aquece a camada interna (13) e funde, o calor é transferido para a carga (12) que também funde enquanto se aquece e forma uma crosta de entulho na superfície interna relativamente fria da camada externa do recipiente de múltiplas camadas (11). Esse processo continua até que a camada interna (13) e a carga (12) do recipiente de múltiplas camadas estejam totalmente fundidas. A carga (12) é rapidamente fundida e diluída em cório devido à baixa condutividade térmica da carga, portanto, a corrente de calor do cório para a camada interna (13) do recipiente de múltiplas camadas será usada quase exclusivamente para fundir a camada interna (13) e a carga (12). A camada de entulho formada pela carga permite limitar a corrente de calor à camada externa (11) do recipiente de múltiplas camadas, redistribuí-lo ao longo da altura da camada externa (11) e achatá-lo em relação à altura local e às flutuações de azimute.

[0101] A limitação de densidade da corrente de calor que passa através da camada externa (11) do recipiente de múltiplas camadas é necessária para garantir uma transferência de calor estável e acrítica para o dissipador de calor final, isto é, água circunferente do coletor de núcleo (8). O calor é transferido para a água no modo "fervura da piscina", que fornece a possibilidade de remoção passiva de calor por um período de tempo ilimitado. A função de restrição de corrente de calor é cumprida por

dois componentes do sistema de refrigeração e confinamento de material fundido do núcleo do reator nuclear.

[0102] O primeiro componente é a carga (10), que, por um lado, fornece a diluição e o aumento do volume da parte que produz o calor do cório, permitindo, assim, aumentar a área de troca de calor enquanto reduz a densidade da corrente de calor através da camada externa (11) do coletor de núcleo (8) e, por outro lado, fornece a inversão do óxido e partes metálicas do cório com a parte de óxido movendo-se para cima e a parte metálica líquida movendo-se para baixo enquanto reduz as correntes de calor máximas para a camada externa (11) pela redistribuição das correntes de calor na parte inferior do coletor do núcleo (8). O segundo componente é a carga (12) do recipiente de múltiplas camadas, que fornece a redução (achatamento) de correntes de calor máximas na camada externa (11), pela formação de crosta de entulho de alta fusão que assegura a redistribuição das correntes de calor máximas do cório por altura e azimute (plano central) da camada externa (11) do coletor de núcleo (8).

[0103] O vapor produzido na camada externa (11) aumenta a superfície e flui através de canais de alívio de vapor para a contenção onde é condensado. O condensado flui a partir da contenção para o reservatório conectado por passagens de fluxo com a cavidade do reator (3) em que o coletor do núcleo (8) está instalado. Portanto, no caso de resfriamento prolongado da circulação de água de resfriamento do coletor de núcleo e remoção constante de calor da camada externa (11) são assegurados. O cório no coletor (8) resfria gradualmente enquanto o calor armazenado e o calor das emissões de energia residual diminuem. Na fase inicial de resfriamento de material fundido após a conclusão da interação com a carga (10), a troca de calor principal é realizada através da camada

externa do recipiente de múltiplas camadas (11). Depois que a água é abastecida no coletor (8), os fluxos de calor são gradualmente equilibrados: o fluxo de calor através da camada externa (11) torna-se igual ao fluxo de calor da superfície do cório. Na fase final, o cório pode ser resfriado diretamente pela água abastecida no coletor de núcleo (8), o que é possível se o cório formar uma estrutura permeável à água durante a sua solidificação.

[0104] Assim, o dito coletor (8) do sistema de confinamento e resfriamento de material fundido de núcleo de reator nuclear moderado por água e resfriado a água, como um todo, permite aumentar a eficácia da remoção de calor do material fundido, enquanto mantém a integridade da camada externa do recipiente de múltiplas camadas (11).

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema de confinamento e resfriamento de material fundido de núcleo de reator nuclear moderado por água e resfriado a água **caracterizado por** conter:

placa de guia em formato de cone instalada sob o fundo do recipiente do reator,

viga de cantiléver instalada sob a placa de guia e que sustenta a mesma,

coletor de núcleo instalado sob a viga de cantiléver e equipado com revestimento resfriado na forma de um recipiente de múltiplas camadas para proteção da parede externa de troca de calor contra impactos dinâmicos, térmicos e químicos,

e material de carga para diluição de material fundido dentro do recipiente de múltiplas camadas,

em que o recipiente contém camadas metálicas interna e externa com uma camada intermediária na forma de uma carga não metálica localizada entre as mesmas, e nervuras de mancal são instaladas entre as camadas interna e externa em um intervalo de azimute ($S_{\text{intervalo}}$) que atende o seguinte critério:

$$d_{\text{ext}} / 15 < S_{\text{intervalo}} < d_{\text{ext}} / 5,$$

em que d_{ext} é o diâmetro externo do recipiente.

2. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** as nervuras de mancal serem presas rigidamente à camada externa e não serem presas à camada interna,

3. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** as nervuras de mancal serem presas rigidamente às camadas externa e interna.

4. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** as nervuras de mancal serem instaladas com folgas térmicas de azimute e radial.

5. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** a parte de fundo do recipiente que conecta a parte de cilindro superior à parte de cone inferior conter um invólucro de três camadas de composto toroidal que garante expansão térmica da camada interna a despeito daquele da camada externa.

6. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** o recipiente conter uma camada resistente à corrosão de 0,1 a 0,5 mm de espessura adicional aplicada na camada externa,

7. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** o recipiente conter uma camada de 0,5 a 5 mm de espessura adicional que aumenta a transferência de calor por convecção para a água aplicada na superfície externa da camada externa.

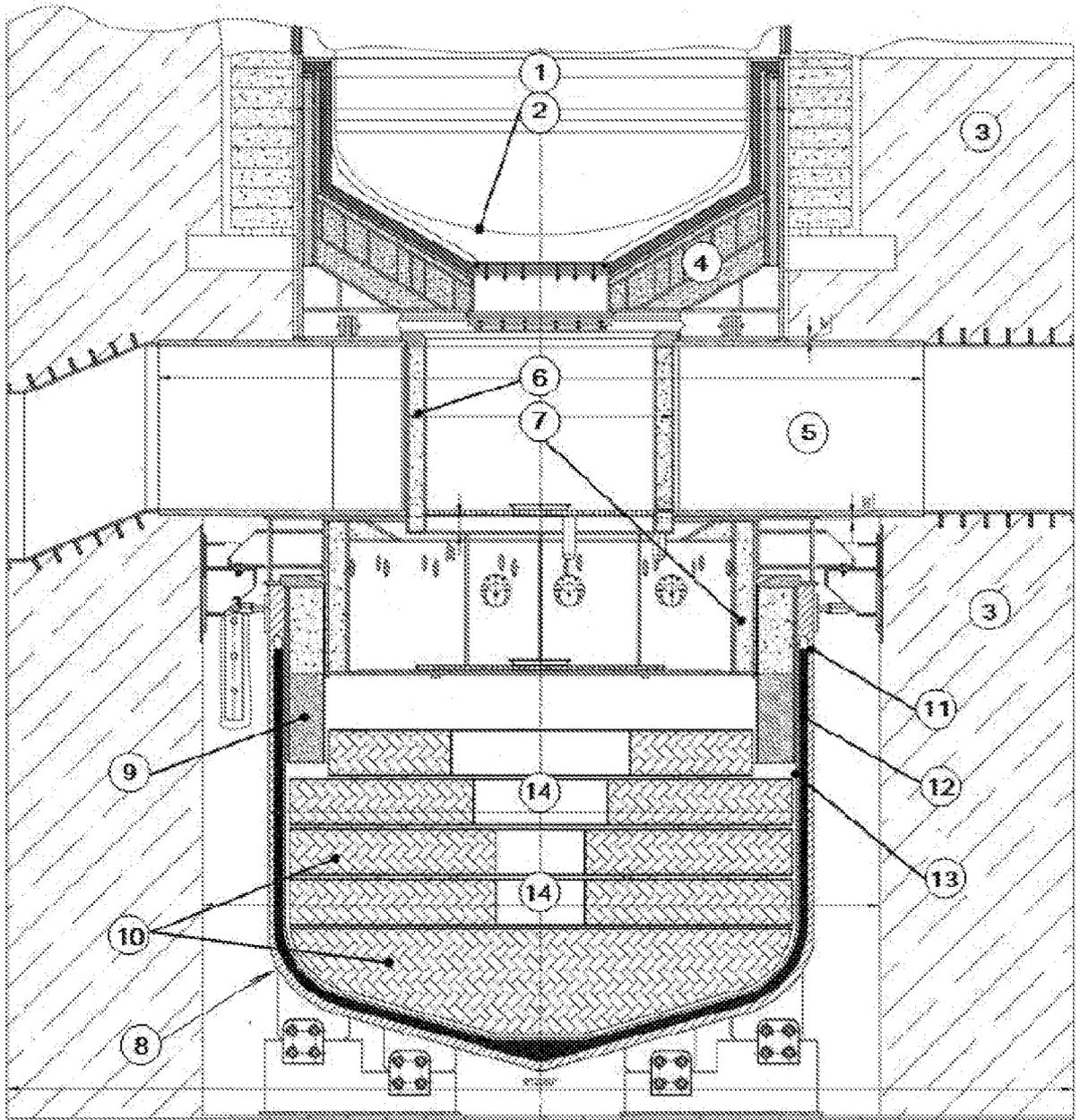
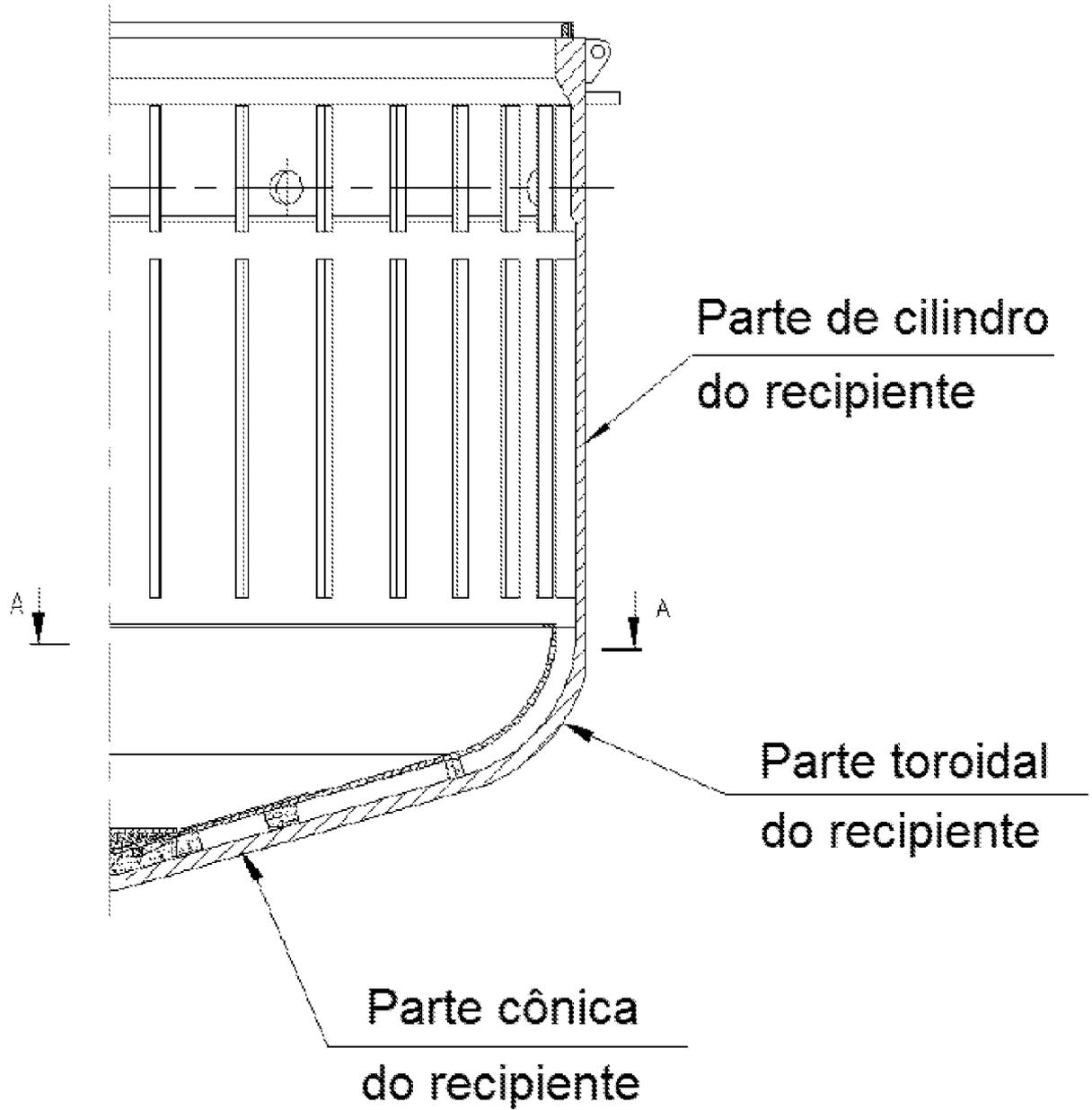


Fig. 1



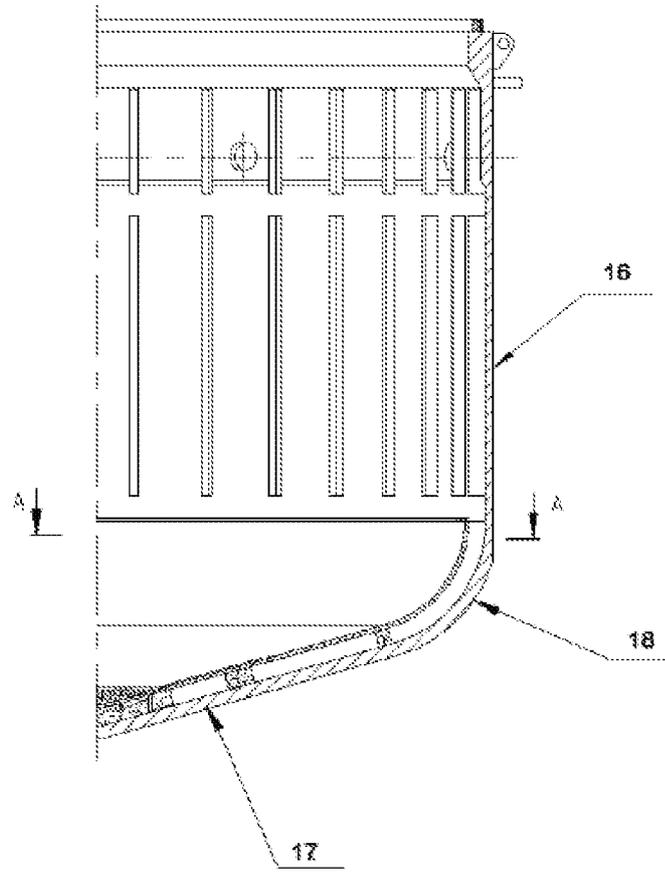


Fig. 2

A-A

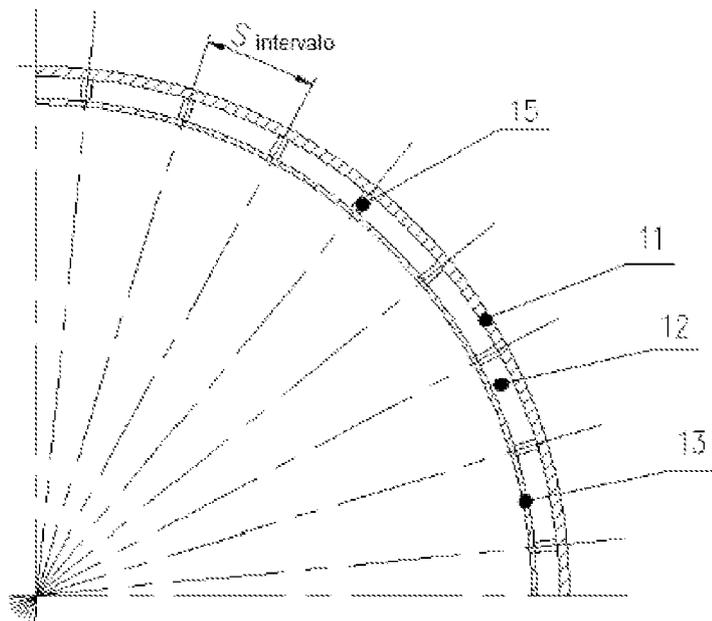


Fig. 3

RESUMO**"SISTEMA DE CONFINAMENTO E RESFRIAMENTO DE MATERIAL FUNDIDO DE NÚCLEO DE REATOR NUCLEAR MODERADO POR ÁGUA E RESFRIADO A ÁGUA"**

A invenção se refere à indústria de energia nuclear, a saber, a sistemas que fornecem segurança de usinas de energia nuclear (NPP), e podem ser usados durante acidentes graves que levam à falha do recipiente do reator e do confinamento de NPP. O sistema de confinamento e resfriamento de material fundido inclui uma placa de guia em formato de cone instalada sob o fundo do recipiente do reator, uma viga de cantiléver instalada sob a placa de guia e que sustenta a mesma, um coletor de núcleo instalado sob a viga de cantiléver e equipado com revestimento resfriado na forma de um recipiente de múltiplas camadas para proteção da parede externa de troca de calor contra impactos dinâmicos, térmicos e químicos, e material de carga para diluição de material fundido dentro do recipiente de múltiplas camadas. O dito recipiente de múltiplas camadas contém as camadas metálicas interna e externa com uma camada intermediária na forma de uma carga não metálica localizada entre as mesmas. As nervuras de mancal são instaladas entre as camadas interna e externa em um intervalo de azimute ($S_{\text{intervalo}}$) que atende ao seguinte critério: $d_{\text{ext}} / 15 < S_{\text{intervalo}} < d_{\text{ext}} / 5$, em que d_{ext} é o diâmetro externo do recipiente. O resultado técnico da invenção é a eficácia aumentada de remoção de calor do material fundido e confiabilidade estrutural aprimorada.