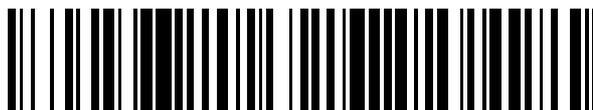


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 670 005**

51 Int. Cl.:

**G21C 7/08** (2006.01)

**G21C 9/027** (2006.01)

**G21C 15/247** (2006.01)

**G21D 3/06** (2006.01)

**G21C 7/22** (2006.01)

**G21C 1/02** (2006.01)

**G21C 7/32** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.01.2015** **E 15150920 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.03.2018** **EP 2894635**

54 Título: **Sistema de parada pasiva y procedimiento de operación de un reactor refrigerado por metal líquido usando el mismo**

30 Prioridad:

**14.01.2014 US 201414154593**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**29.05.2018**

73 Titular/es:

**GE-HITACHI NUCLEAR ENERGY AMERICAS LLC  
(100.0%)  
3901 Castle Hayne Road  
Wilmington, NC 28401, US**

72 Inventor/es:

**LOEWEN, ERIC PAUL;  
CUNDIFF, WESTIN MATTHEW;  
SAHA, PRADIP y  
BASS, DEREK**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 670 005 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Sistema de parada pasiva y procedimiento de operación de un reactor refrigerado por metal líquido usando el mismo

### Antecedentes

#### Campo

- 5 La presente divulgación se refiere a sistemas y a procedimientos de protección de uso de los mismos en un reactor nuclear.

#### Descripción de la técnica relacionada

10 En un reactor refrigerado por metal líquido convencional, se establece una alta tasa de flujo de refrigerante primario y secundario (> 90 %) antes de traer el núcleo del reactor a un estado crítico. Para aumentar la potencia eléctrica a la red, la salida de la temperatura central aumenta, por lo tanto, "empujando" más calor fuera del sistema de potencia. Este procedimiento ocasiona dos problemas: costosas cargas de bombeo a baja potencia y grandes variaciones térmicas durante los cambios en la potencia del reactor (induce tensiones térmicas en todo el sistema de fluidos). Estos dos problemas inhiben la capacidad del sistema de cargar de manera responsable según lo diseñado. Estos problemas conducen a mayores costes de operación y mantenimiento para el propietario de la planta.

15 En particular, en un reactor refrigerado por metal líquido convencional, se aumenta la temperatura para aumentar la salida de potencia a la red. Puede haber un cambio de temperatura de aproximadamente 175 °C cuando el reactor pasa de 0 a 100 % de potencia. Si la planta se utiliza para el seguimiento de carga, esto inducirá una gran cantidad de ciclos térmicos. Los ciclos térmicos en sodio, también conocidos como agotamiento térmico, causan desgaste innecesario en los componentes metálicos. Además, en operaciones de baja potencia, las bombas primaria y secundaria deben operar al 100 % de flujo, lo que consume una gran cantidad de energía. Por ejemplo, cuando PRISM está funcionando con 100 % de potencia y 100 % de flujo, las bombas primarias y secundarias consumen aproximadamente el 7 % de la potencia eléctrica del reactor. Este porcentaje aumenta a medida que disminuye la potencia del reactor porque el flujo de sodio debe permanecer constante.

25 Los reactores nucleares también utilizan una variedad de dispositivos de prevención / mitigación de los daños para evitar daños en el núcleo. Estos dispositivos típicamente se centran en un sistema de control que detecta un "problema" y luego activa el sistema de protección. Un aspecto importante de la mitigación del riesgo es la prevención del daño al núcleo en los segundos posteriores a la pérdida del flujo de refrigerante primario. Un módulo de expansión de gas (GEM) se usa convencionalmente para proteger el núcleo de un reactor refrigerado por metal líquido en caso de falla de la bomba. El GEM tiene dos estados operativos: uno en el que se vacía de sodio (sin flujo) y otro en el que está lleno de sodio (a alto flujo). El GEM es un tubo invertido lleno de gas helio a una densidad específica. El GEM se comunica con el pleno de entrada del núcleo (el punto de mayor presión del sistema). Sin flujo de la bomba, el gas se expande casi hasta el fondo del GEM creando un conjunto vacío en el exterior del núcleo. Durante el arranque de la planta, las bombas se activan para proporcionar flujo para eliminar el calor de fisión. El refrigerante de alta presión en la cámara impelente de admisión comprime el gas en el GEM llenando la mayor parte con sodio, lo que reduce la fuga de neutrones del núcleo por reflexión de los neutrones. El GEM puede tener efectos de reactividad en el núcleo si el gas de helio no se comprime lo suficientemente alto en el GEM. El problema requiere que el flujo de refrigerante primario se establezca a un flujo nominal superior al 90 %. Un GEM lleno en este flujo del núcleo no inducirá oscilaciones de potencia con oscilaciones de flujo normales. Si las bombas se apagan, por cualquier razón, el gas comprimido se expande y restablece el vacío. Esto aumenta la fuga de neutrones que inserta reactividad negativa. Esta reactividad negativa lleva el reactor a un estado subcrítico.

40 Los documentos JP H07-209468 A y GB 1 524 179 A se refieren a un dispositivo de flotación de control para un reactor nuclear. El documento GB 2.075.245 A se refiere a una columna de control del reactor nuclear.

#### Breve descripción de realizaciones ejemplares

45 Un procedimiento de funcionamiento de un metal líquido del reactor se enfrió de acuerdo con la invención se define en la reivindicación 1. Un sistema de parada pasiva para un reactor de metal líquido refrigerado de acuerdo con la invención se define en la reivindicación 7.

#### Breve descripción de los dibujos

50 Las diversas características y ventajas de las realizaciones no limitantes en este documento pueden ser más evidentes tras la revisión de la descripción detallada en conjunción con los dibujos adjuntos. Los dibujos adjuntos se proporcionan meramente con fines ilustrativos y no deben interpretarse para limitar el alcance de las reivindicaciones. Los dibujos adjuntos no deben considerarse como dibujados a escala a menos que se indique explícitamente. Para fines de claridad, varias dimensiones de los dibujos pueden haber sido exageradas.

La figura 1 es una vista en sección transversal de un sistema de parada pasiva para un reactor refrigerado por metal líquido de acuerdo con una realización no limitativa de la presente descripción.

La figura 2 es una vista en sección transversal de un sistema de parada pasiva para un reactor refrigerado por metal líquido de acuerdo con otra realización no limitativa de la presente descripción.

La figura 3 es una vista en sección transversal de una operación de un sistema de parada pasiva en un reactor refrigerado por metal líquido de acuerdo con una realización no limitativa de la presente descripción.

5 La figura 4 es una vista en sección transversal de un sistema de parada pasiva para un reactor refrigerado por metal líquido de acuerdo con otra realización no limitativa de la presente descripción.

La figura 5 es una vista en sección transversal de un sistema de parada pasiva para un reactor refrigerado por metal líquido de acuerdo con otra realización no limitativa de la presente descripción.

10 La figura 6 muestra las relaciones entre el flujo y la potencia del reactor de acuerdo con una realización no limitativa de la presente descripción.

### **Descripción detallada de las realizaciones**

15 Se entenderá que cuando un elemento o capa se denomina como estando "sobre", "conectado a", "acoplado a", o "cubriendo" otro elemento o capa, puede estar directamente sobre, conectado a, acoplado a, o cubriendo el otro elemento o capa o pueden estar presentes elementos o componentes intervinientes. Por el contrario, cuando se hace referencia a un elemento como "directamente sobre", "directamente conectado a" o "directamente acoplado a" otro elemento o capa, no hay elementos intermedios o capas presentes. Números iguales se refieren a elementos similares a lo largo de la especificación. Como se usa en el presente documento, el término "y / o" incluye cualquiera y todas las combinaciones de uno o más de los artículos enumerados asociados.

20 Debe entenderse que, aunque los términos primero, segundo, tercero, etc., pueden ser utilizados en el presente documento para describir varios elementos, componentes, regiones, capas y / o secciones, estos elementos, componentes, regiones, capas y / o secciones no deben estar limitados por estos términos. Estos términos solo se pueden usar para distinguir un elemento, componente, región, capa o sección de otro elemento, componente, región, capa o sección. Por lo tanto, un primer elemento, componente, región, capa o sección discutidos a continuación podría denominarse segundo elemento, componente, región, capa o sección sin apartarse de las enseñanzas de las realizaciones de ejemplo.

25 Los términos espacialmente relativos (por ejemplo, "debajo", "por debajo", "inferior", "encima", "superior" y similares) se pueden usar aquí para facilitar la descripción para describir una relación de elemento o característica con otro elemento(s) o característica(s) como se ilustra en las figuras. Debe entenderse que los términos espacialmente relativos pueden pretender abarcar diferentes orientaciones del dispositivo en uso u operación además de la orientación representada en las figuras. Por ejemplo, si se da la vuelta al dispositivo en las figuras, los elementos descritos como "debajo" o "por debajo" de otros elementos o características se orientarían "encima" de los otros elementos o características. Por lo tanto, el término de ejemplo "debajo" puede abarcar tanto una orientación de encima como de debajo. El dispositivo puede estar orientado de otro modo (girado 90 grados o en otras orientaciones) y los descriptores relativos espacialmente usados en este documento se interpretan en consecuencia.

35 La terminología usada en este documento es para el propósito de describir solamente realizaciones ejemplares particulares y no se pretende que sea limitativa. Como se usa en el presente documento, la forma singular "un", "una" y "el/la" incluyen referencias plurales, a menos que el contexto dicte claramente lo contrario. Se entenderá además que los términos "comprende", «comprendiendo», "incluye" y / o "incluyendo" cuando se usan en la presente memoria, especifican la presencia de características, números enteros, etapas, operaciones, elementos y / o componentes, pero sí no impiden la presencia o adición de una o más características, números enteros, etapas, operaciones, elementos y / o componentes.

40 Las realizaciones de ejemplo se describen en la presente memoria con referencia a ilustraciones de sección transversal que son ilustraciones esquemáticas de realizaciones idealizadas (y estructuras intermedias) de realizaciones de ejemplo. Como tal, se esperan variaciones de las formas de las ilustraciones como resultado, por ejemplo, de técnicas de fabricación y / o tolerancias. Por lo tanto, las formas de realización de ejemplo no deben interpretarse como limitadas a las formas de las regiones ilustradas en este documento, sino que deben incluir desviaciones en las formas que resultan, por ejemplo, de la fabricación. Por ejemplo, una región implantada ilustrada como un rectángulo tendrá, típicamente, características redondeadas o curvadas y / o un gradiente de concentración de implante en sus bordes en lugar de un cambio binario desde la región implantada a la no implantada. Del mismo modo, una región enterrada formada por implantación puede dar como resultado cierta implantación en la región entre la región enterrada y la superficie a través de la cual tiene lugar la implantación. De este modo, las regiones ilustradas en las figuras son de naturaleza esquemática y sus formas no están destinadas a ilustrar la forma real de una región de un dispositivo y no están destinadas a limitar el alcance de las realizaciones de ejemplo.

55 A menos que se defina lo contrario, todos los términos (incluyendo términos técnicos y científicos) usados aquí tienen el mismo significado que se entiende comúnmente por un experto ordinario en la técnica a la que pertenece esta invención. Se entenderá además que los términos, tales como aquellos definidos en los diccionarios comúnmente usados, deben interpretarse como que tienen un significado que es consistente con su significado en el

contexto de la técnica relevante y no deben interpretarse en un sentido idealizado o excesivamente formal a no ser que se defina expresamente en la presente memoria.

En un ejemplo de realización, la presente descripción se refiere a un procedimiento para el flujo y las barras de control para controlar los ajustes de potencia del reactor en reactores rápidos de metal líquido. La mayoría de los gastos relacionados con la energía nuclear se deben a operaciones y mantenimiento (O & M) y los costes de combustible. O & M son típicamente más altos que los costes de combustible. La mejora de los márgenes de O & M puede hacer que la energía nuclear sea más competitiva en el mercado. Un sistema de parada pasiva para un disparo de bomba nuclear puede usarse para permitir que los reactores rápidos de metal líquido operen a una temperatura de salida del núcleo relativamente constante, permitiendo controlar la potencia del reactor a través del flujo del núcleo y los ajustes de las barras de control (similar a un reactor de agua hirviendo (BWR)). El nuevo procedimiento en este documento reduce los costes de O & M reduciendo los gradientes de temperatura extrema en el sistema reduciendo así las tensiones térmicas inducidas por estos gradientes de temperatura (menos mantenimiento) y reduciendo la potencia de bombeo requerida a niveles de potencia del reactor más bajos (menos consumo de energía por lo tanto más electricidad para la venta). Se puede instalar un dispositivo pasivo de pérdida de flujo que no afecte la reactividad después de que se establezca un determinado flujo. Una vez que se instala este dispositivo, el operador ahora tiene la libertad de cambiar el flujo, así como las barras de control para controlar la potencia del reactor.

Los procedimientos convencionales requieren un flujo relativamente alto (90 % -100 %), independientemente de la potencia del reactor. En particular, en los procedimientos de control de PRISM convencionales y aquellos diseños de reactores que lo preceden, la potencia del reactor se controló al permitir que cambiara la diferencia de temperatura entre la entrada del reactor y la temperatura de salida, ya que el caudal se mantuvo constante. Tal enfoque se representa a continuación por la siguiente expresión.

$$Q = \frac{m\Delta T}{R}$$

Por el contrario, un procedimiento según un ejemplo de realización hay que mantener la diferencia de temperatura lo más cerca posible a constante como sea posible mientras que se mueve las barras de control y / o el cambio de caudal másico para cambiar la potencia del reactor. Este procedimiento tiene la ventaja de reducir el ciclo térmico presente en los componentes de la planta durante las operaciones de seguimiento de carga (la potencia del reactor se cambia con frecuencia). El presente enfoque se representa a continuación con la siguiente expresión.

$$Q = \frac{m\Delta T}{R}$$

El presente procedimiento permite que el sistema de reactor que se hace funcionar a una temperatura del refrigerante constante. Los ajustes del flujo de bombeo y las barras de control pueden usarse únicamente para "transportar" más energía fuera del sistema. Este procedimiento mueve el control del reactor de "empujar" el calor al aumentar la temperatura del refrigerante para "transportar" el calor de fisión a través de los cambios en el flujo del núcleo. El flujo de la bomba seguirá la potencia del reactor para mantener una temperatura constante del refrigerante. El consumo de energía de bombeo se reduce a baja potencia del reactor. Esto también reducirá el estrés térmico en el IHX, las entradas y salidas de la bomba y la lámina del tubo del generador de vapor. Un reactor rápido refrigerado por metal puede mejorarse en la carga siguiente a un LWR. En resumen, las ventajas técnicas incluyen reducir la potencia de bombeo, aumentar la vida útil de los componentes debido a la fatiga térmica mitigada, mejorar las capacidades de seguimiento de carga de un bloque de energía PRISM, disminuir el desgaste de flujo / erosión a bajos niveles de potencia operativa y mejorar la adaptación de la potencia al flujo para la estabilidad del núcleo. Las ventajas comerciales pueden incluir menos costes de O & M para el cliente, menos costes de energía de bombeo para el cliente, una respuesta más rápida a los cambios de carga en la red, más ventas de reactores PRISM ofreciendo flexibilidad operativa y ventajas comerciales, y más flexibilidad operativa.

En otro ejemplo de realización, la presente descripción se refiere a un sistema de parada pasiva para un viaje de bomba de reactor nuclear. El sistema ayudará a resolver el problema del daño del combustible durante un evento de pérdida de flujo en un reactor líquido refrigerado por metal al tiempo que reduce las tensiones térmicas en el circuito primario, secundario y a través de la placa del tubo del generador de vapor. Aunque los reactores refrigerados por metal (por ejemplo, reactores refrigerados por sodio) se discuten aquí, se debe entender que el sistema se puede usar en otros diseños de reactor. El sistema acopla la presión diferencial del núcleo, la gravedad, la absorción de neutrones y la física del reactor para insertar reactividad negativa en el núcleo para llevar el reactor a un estado seguro y subcrítico. Después del disparo de las bombas primarias (detiene el bombeo inesperadamente), el absorbente de neutrones asistido por gravedad desciende al núcleo y la física del reactor muestra que la reacción de fisión en cadena se detendrá, reduciendo así la producción de calor solo al calor de descomposición. A diferencia de un diseño GEM, no se requiere que el sistema primario esté al 90 % del flujo del núcleo para que se mantenga la criticidad. Esto permite que el operador de la planta haga coincidir la potencia del reactor con el flujo del núcleo,

reduciendo así la cantidad de estrés térmico en todo el sistema de fluido. El sistema restablece su funcionalidad después de un evento de pérdida de flujo simplemente restableciendo el flujo primario de la bomba.

Como se señaló anteriormente, un peligro conocido de operar núcleos de los reactores rápidos es la pérdida de flujo que conduce a alimentar de fusión desde la generación de energía continúa sin el refrigerante para eliminar el calor. El peligro puede mitigarse o prevenirse detectando directa e inmediatamente una pérdida de flujo, y luego insertando reactividad negativa, de modo que la potencia del reactor en esa área se reduzca instantáneamente. Tal mitigación o prevención se puede lograr con un sistema de parada pasiva que utiliza un absorbente de neutrones en forma de una estructura flotante. Usando un balance de fuerzas y la ecuación para la fuerza de arrastre, la siguiente expresión se puede usar para determinar el caudal requerido para levantar la estructura de flotación.

10 Un equilibrio de fuerzas en el flotador da

$$F_d + \rho_l V_f \frac{g}{g_c} = \rho_f V_f \frac{g}{g_c}$$

La fuerza de arrastre se expresa mediante

$$F_d = C_d A_f \frac{\rho_l u_m^2}{2g_c}$$

La combinación de las dos ecuaciones anteriores se puede determinar el caudal requerido para mover el flotador.

15

$$u_m = \left[ \frac{1}{C_d} \frac{2gV_f}{A_f} \left( \frac{\rho_f}{\rho_l} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

$$Q = Au_m = \frac{\pi}{4} [(D + ay)^2 - d^2] \left[ \frac{1}{C_d} \frac{2gV_f}{A_f} \left( \frac{\rho_f}{\rho_l} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

Las descripciones de las variables anteriores se encuentran en la siguiente tabla.

Variable	Descripción
A	Área de flujo anular
A <sub>f</sub>	Área frontal de flotación
a	Constante que describe el cono del tubo
C <sub>d</sub>	Coefficiente de arrastre
D	Diámetro de entrada de la manga
d	Diámetro máximo del flotador
F <sub>d</sub>	Fuerza de arrastre
g	Aceleración de la gravedad
Q	Tasa de flujo de líquido
u <sub>m</sub>	Caudal medio
V <sub>f</sub>	Volumen de flotación
y	Distancia vertical del flotador en el tubo
ρ <sub>f</sub>	Densidad de flotación
ρ <sub>l</sub>	Densidad de líquido

20 En una realización no limitante, el flotador puede tener una masa de 15,8 kg, un volumen de 2.780 cm<sup>3</sup> y por lo tanto una densidad (ρ<sub>f</sub>) de 5,683 kg / m<sup>3</sup>. Por lo tanto, el flotador puede tener una densidad menor que la del hierro puro. El líquido puede tener una densidad (ρ<sub>l</sub>) de 846 kg / m<sup>3</sup>. Como resultado, la relación (ρ<sub>f</sub> / ρ<sub>l</sub>) de la densidad de flotación a la densidad del líquido puede ser de aproximadamente 6,72, aunque las realizaciones de ejemplo no están limitadas a esto.

25 El flotador (también denominado en este documento como un absorbente de neutrones o un material absorbente) puede estar alojado dentro de un tubo del sistema de parada pasiva. Un flujo de sodio puede ingresar al tubo a través de una pieza de nariz. Durante condiciones de bajo flujo, la fuerza de arrastre del fluido en el flotador no es lo suficientemente grande como para mover el flotador. La trayectoria de flujo definida por el tubo puede ser cónica, lo que ayuda a impulsar el fluido y evita que el flotador caiga por debajo de la región activa del núcleo. Alternativamente, la trayectoria de flujo definida por el tubo puede ser uniforme. En condiciones de energía más altas  
30 (por ejemplo, > 25 %), la fuerza de arrastre del fluido aumenta hasta que el material absorbente se mueve hacia arriba fuera de la región activa del núcleo. A diferencia de un GEM, el flotador contiene material absorbente, que produce un calentamiento interno a través de la absorción de neutrones. Los expertos en la materia comprenderán que la velocidad de generación de calor interno puede ajustarse (con masa absorbente y flujo de sodio) de modo que este dispositivo de parada pasiva esté en equilibrio térmico con su entorno. Mantener este dispositivo cerca del

equilibrio térmico con el núcleo permite aumentar la retroalimentación de temperatura negativa del núcleo.

5 La parte superior del tubo puede tener un muelle que está configurado para enviar una señal a la sala de control cuando se comprime. Esta disposición informaría al operador que el flotador con material absorbente está completamente fuera del núcleo. Con una gran variación de flujo (disminución), el muelle y la gravedad obligarán al dispositivo absorbente a volver al núcleo, lo que llevará al núcleo a un estado subcrítico. El muelle también se puede usar en conexión con un mecanismo de enganche para reducir las vibraciones inducidas por el flujo sobre el material absorbente (en donde tales vibraciones pueden causar potencialmente cambios de reactividad en el núcleo o desgaste innecesario dentro del sistema).

10 La cantidad de flujo y por lo tanto arrastrar fuerza requerida para mover el material absorbente fuera de la región de núcleo activo puede ser controlada mediante el control de la masa del material absorbente (es decir, un dispositivo más pesado requerirá una fuerza de presión más grande y por lo tanto una mayor tasa de flujo de sodio que un dispositivo más ligero). En una realización no limitativa, un flujo de núcleo inferior al 10 % (o una presión diferencial de 10 PSID) no elevará el material absorbente. Cuando el flujo del núcleo supera el 25 % del flujo del núcleo medido, el dispositivo está completamente "posicionado" o "enganchado" si se utiliza un mecanismo de enganche.

15 En este punto, se puede lograr la criticidad del reactor. Las barras de control se retiran hasta que se alcanza la criticidad. La configuración actual permite una mayor flexibilidad de operación y menos tensiones térmicas en el sistema de fluido durante la puesta en marcha al tener un requisito de flujo de núcleo inicial mucho más bajo. La secuencia de inicio ahora se puede controlar utilizando barras y un flujo de núcleo similar a un LWR.

20 Durante el funcionamiento de alimentación, el dispositivo de flotador o material absorbente no afecta a la operación del reactor, debido a que el flujo del núcleo se mantiene significativamente por encima de flujo del núcleo 25 %, manteniendo de ese modo el dispositivo de flotación en una posición lista para insertar en el núcleo.

25 En el caso de pérdida de flujo primario, la fuerza de arrastre sobre el dispositivo de flotador disminuirá rápidamente. Esta disminución conducirá el material absorbente al núcleo y causará una inserción de reactividad negativa similar a la de una barra de control que se inserta. Esta inserción de reactividad negativa llevará el reactor a un estado seguro y subcrítico, evitando así el daño al combustible incluso en caso de pérdida de flujo.

30 En resumen, las ventajas técnicas del presente sistema pueden incluir la mitigación o prevención de daños en el núcleo, la activación pasiva, la protección de flujo en el núcleo, la capacidad de comunicar que el sistema está en modo de espera, la capacidad de estar en equilibrio térmico con los componentes del núcleo circundante debido al calentamiento interno y la capacidad de combinar el flujo y la potencia, lo que permite una mayor flexibilidad operativa. Además, las ventajas comerciales pueden incluir una mejora en la robustez de un reactor refrigerado por metal y una reducción en los costes de operación y mantenimiento de un reactor refrigerado por metal. Las realizaciones a modo de ejemplo de la presente descripción se discuten a continuación con más detalle en relación con los dibujos adjuntos.

35 La figura 1 es una vista en sección transversal de un sistema de parada pasiva para un reactor refrigerado por metal líquido de acuerdo con una realización no limitativa de la presente descripción. Haciendo referencia a la figura 1, el sistema 100 de parada pasiva incluye un tubo 104 y un absorbedor 106 de neutrones dentro del tubo 104. El tubo 104 está configurado para extenderse a través de un núcleo del reactor refrigerado por metal líquido. El bastidor 104 tiene un extremo 110 superior y un extremo 112 inferior opuesto. El tubo 104 puede ser una estructura hueca y cilíndrica. El extremo 112 inferior del tubo 104 puede estar comprimido para estar en forma de una pieza de nariz. El tubo 104 define una trayectoria de flujo para un refrigerante 102 de metal líquido. El absorbedor 106 de neutrones tiene una densidad más alta que el refrigerante 102 de metal líquido. El tubo 104 puede extenderse verticalmente desde el extremo 110 superior al extremo 112 inferior.

45 El tubo 104 puede estar configurado para impedir que el absorbedor 106 de neutrones pase a través del extremo 110 superior y el extremo 112 inferior del tubo 104. Por ejemplo, el tubo 104 puede configurarse para impedir que una superficie superior del absorbedor 106 de neutrones pase por debajo de una región 108 activa del núcleo. En particular, un tope 114 inferior puede estar dispuesto en una superficie interna del tubo 104. El tope 114 inferior está configurado para permitir que el flujo del refrigerante 102 de metal líquido pase y soporte un peso del absorbedor 106 de neutrones cuando el flujo del refrigerante 102 de metal líquido es insuficiente para hacer flotar el absorbedor 106 de neutrones dentro de la trayectoria del flujo. El tope 114 inferior puede estar alineado con un límite inferior de una región 108 activa del núcleo. El tope 114 inferior puede ser una banda o reborde anular asegurada a la superficie interna del tubo 104. Alternativamente, el tope 114 inferior puede tener la forma de una o más pestañas (por ejemplo, 3, 4) aseguradas a la superficie interna del tubo 104.

55 Un tope 116 superior también puede estar dispuesto sobre una superficie interior del tubo 104. El tope 116 superior está configurado para permitir que el flujo del refrigerante 102 de metal líquido pase a través mientras retiene el absorbedor 106 de neutrones dentro del tubo 104. El tope 116 superior también está posicionado dentro del tubo 104 para permitir que el absorbedor 106 de neutrones flote completamente por encima de la región 108 activa del núcleo cuando el reactor está en un estado crítico. El tope 116 superior puede ser una banda o reborde anular asegurada a la superficie interna del tubo 104. Alternativamente, el tope 116 superior puede estar en forma de una o más lengüetas (por ejemplo, 2, 3, 4) aseguradas a la superficie interna del tubo 104.

El absorbedor 106 de neutrones es una estructura móvil configurado para obstruir parcialmente un flujo del refrigerante 102 de metal líquido dentro de la trayectoria de flujo definida por el tubo 104. El absorbedor 106 de neutrones puede tener una sección transversal nuclear de al menos 2000 barnios. Una relación de densidad del absorbedor 106 de neutrones con respecto al refrigerante 102 de metal líquido puede variar de aproximadamente 1 a 4 (por ejemplo, de 1,5 a 4). El tamaño del absorbedor 106 de neutrones puede corresponder suficientemente al tamaño de la trayectoria de flujo definida por el tubo 104 para evitar que el absorbedor 106 de neutrones se acople en un movimiento de volteo durante el flujo del refrigerante 102 de metal líquido a través del tubo 104. La altura del absorbedor 106 de neutrones puede ser al menos la altura de la región activa 108 del núcleo.

La figura 2 es una vista en sección transversal de un sistema de parada pasiva para un reactor refrigerado por metal líquido de acuerdo con otra realización no limitativa de la presente descripción. Haciendo referencia a la figura 2, el sistema de parada pasiva 200 incluye un pestillo 118 en el extremo 110 superior del tubo 104. El pestillo 118 está configurado para acoplarse al absorbedor 106 de neutrones y reducir las vibraciones inducidas por el flujo. Un muelle 120 también está dispuesto en el extremo 110 superior del tubo 104. El muelle 120 está configurado para disparar una señal cuando es comprimido por el absorbedor 106 de neutrones. La señal puede indicar a un operador que el absorbedor 106 de neutrones está fuera del núcleo. Los otros componentes que se muestran en la figura 2 pueden ser como se describe en relación con la figura 1.

La figura 3 es una vista en sección transversal de una operación de un sistema de parada pasiva en un reactor refrigerado por metal líquido de acuerdo con una realización no limitativa de la presente descripción. En particular, la figura 3 muestra la operación de la figura 2 en más detalle. Haciendo referencia a la figura 3, a un flujo mayor del refrigerante 102 de metal líquido, el absorbedor 106 de neutrones flota hacia arriba en el tubo 104 y se aplica al pestillo 118 y comprime el muelle 120. Una vez acoplado, el pestillo 118 está diseñado para mantener el absorbedor 106 de neutrones hasta la aplicación de una fuerza descendente suficiente para liberar el pestillo 118. En la figura 3, la fuerza descendente suficiente puede ser en forma de gravedad y el muelle 120 comprimido, aunque las realizaciones a modo de ejemplo no están limitadas a esto. La capacidad del pestillo 118 para mantener el absorbedor 106 de neutrones hasta la aplicación de una fuerza de umbral permite la reducción o prevención de pequeños movimientos hacia arriba y hacia abajo causados por pequeñas fluctuaciones de flujo. En el caso de una pérdida de flujo, la fuerza hacia arriba del refrigerante 102 de metal líquido ya no estará presente para superar la fuerza de la gravedad y el muelle 120 en el absorbedor 106 de neutrones. Como resultado, el pestillo 118 liberará el absorbedor 106 de neutrones, y el absorbedor 106 de neutrones descansará sobre el tope 114 inferior, colocando así el reactor en un estado subcrítico.

La figura 4 es una vista en sección transversal de un sistema de parada pasiva para un reactor refrigerado por metal líquido de acuerdo con otra realización no limitativa de la presente descripción. Haciendo referencia a la figura 4, el sistema 400 de parada pasiva incluye un tubo 404 y un absorbedor 406 de neutrones dentro del tubo 404. El tubo 404 está configurado para extenderse a través de un núcleo del reactor refrigerado por metal líquido. El bastidor 404 tiene un extremo 410 superior y un extremo 412 inferior opuesto. El extremo 412 inferior del tubo 404 puede estar comprimido para estar en forma de una pieza de nariz. El tubo 404 define una trayectoria de flujo para un refrigerante 102 de metal líquido. En la figura 4, la trayectoria del flujo se expande desde el extremo inferior 412 al extremo 410 superior. El absorbedor 406 de neutrones tiene una forma tal que la parte superior es más ancha que la parte inferior. El tamaño de la parte superior del absorbedor 406 de neutrones puede adaptarse para apoyarse en una sección deseada de la trayectoria de flujo en el caso de una pérdida de flujo, en el que la sección deseada de la trayectoria de flujo puede corresponder a la región 108 activa del núcleo.

La figura 5 es una vista en sección transversal de un sistema de parada pasiva para un reactor refrigerado por metal líquido de acuerdo con otra realización no limitativa de la presente descripción. Haciendo referencia a la figura 5, el sistema 500 de parada pasiva incluye un muelle 420 en el extremo 410 superior del tubo 404. El muelle 420 está configurado para disparar una señal cuando es comprimido por el absorbedor 406 de neutrones. La señal puede indicar a un operador que el absorbedor 406 de neutrones está fuera del núcleo. Los otros componentes que se muestran en la figura 5 pueden ser como se describe en relación con la figura 4.

En vista de lo anterior, un procedimiento de funcionamiento de un metal líquido refrigerado del reactor incluye hacer fluir un refrigerante de metal líquido a un caudal a través de un núcleo del reactor refrigerado por metal líquido a través de un tubo que contiene un absorbente de neutrones en el mismo. El tubo es más largo que una región activa del núcleo. El tubo incluye un extremo superior y un extremo inferior. El extremo superior del tubo está por encima de la región activa del núcleo. El extremo inferior del tubo está debajo de la región activa del núcleo. El tubo define una trayectoria de flujo para el refrigerante de metal líquido. El absorbedor de neutrones es una estructura móvil dentro de la trayectoria del flujo. El procedimiento también incluye controlar una salida de potencia del reactor refrigerado por metal líquido en base al flujo del refrigerante de metal líquido a través del tubo. El tubo está configurado de tal manera que el refrigerante líquido metálico entra en la trayectoria del flujo a través del extremo inferior del tubo y es guiado hacia arriba más allá del absorbedor de neutrones para salir del extremo superior del tubo. Una posición del absorbedor de neutrones dentro de la trayectoria del flujo depende del flujo del refrigerante de metal líquido a través del tubo. El tubo comprende además un pestillo en el extremo superior del tubo, en el que el pestillo está configurado para acoplarse al absorbedor de neutrones y para reducir las vibraciones inducidas por el flujo. La etapa de control puede incluir aumentar el caudal del refrigerante de metal líquido para aumentar la potencia de salida del reactor refrigerado por metal líquido. Por el contrario, la etapa de control puede incluir disminuir el

caudal del refrigerante de metal líquido para disminuir la potencia de salida del reactor refrigerado por metal líquido. La etapa de control puede incluir adicionalmente colocar el reactor refrigerado por metal líquido en un estado crítico cuando la velocidad de flujo del refrigerante de metal líquido es al menos 15 % de un flujo nominal para el reactor refrigerado por metal líquido. La etapa de control también puede incluir mantener una temperatura de salida del núcleo a un nivel constante cuando el reactor refrigerado por metal líquido se encuentra en un estado crítico. La etapa de control puede incluir además colocar el reactor refrigerado por metal líquido en un estado subcrítico cuando el caudal del refrigerante de metal líquido es insuficiente para hacer flotar el absorbente de neutrones dentro de la trayectoria de flujo.

La figura 6 muestra las relaciones entre el flujo y la potencia del reactor de acuerdo con una realización no limitativa de la presente descripción. El gráfico superior de la figura 6 muestra el flujo de sodio primario frente a la potencia del reactor. Debido a la presencia de un dispositivo de parada pasiva que se inicia con flujo bajo, hay un valor de umbral de flujo primario donde el reactor no puede volverse crítico (4a). Después de superar este valor umbral, la potencia del reactor puede aumentarse a un flujo constante (4b). Esto se puede hacer calentando la temperatura de salida de sodio a la temperatura de funcionamiento deseada. Una vez que se obtiene la temperatura de funcionamiento deseada, se puede realizar una serie de aumentos de flujo y retiros de la barra de control para alcanzar la potencia operativa deseada (4c). Esto permite que el 100 % del flujo corresponda al 100 % de la potencia del reactor (4d).

El gráfico medio de la figura 6 muestra el flujo de sodio secundario frente a la potencia del reactor. El circuito de sodio secundario sigue el circuito de flujo primario. A medida que se cambia el flujo primario, también se cambia el flujo secundario. Como se muestra en la figura 6, los caudales de sodio primarios representados como regiones 4a, 4b, 4c y 4d del gráfico superior coinciden con los caudales de sodio secundarios representados en las regiones 5a, 5b, 5c y 5d del gráfico central.

El gráfico inferior de la figura 6 muestra el flujo de agua / vapor frente a la potencia del reactor. Como se mencionó anteriormente, existe un valor de tasa de flujo umbral para el cual no se puede lograr la potencia del reactor (6a). A medida que aumenta la potencia del reactor y se calienta el circuito de sodio, el caudal de agua de alimentación se mantiene constante y la temperatura del agua se calienta hasta que se alcanza la temperatura y presión del vapor de salida del generador de vapor recalentado (6b). Las bombas de agua de alimentación se controlan controlando la presión del vapor a la turbina. Para evitar cambios en las condiciones de vapor, el agua de alimentación aumenta a medida que aumenta la potencia del reactor y el flujo de sodio subsiguiente (6c). Esto permite que el 100 % del flujo corresponda al 100 % de la potencia del reactor (6d). Con el procedimiento discutido en este documento, la operación del reactor refrigerado por metal puede avanzarse para que sea más económico y más favorable para un seguimiento de carga rápido.

Mientras que un número de realizaciones de ejemplo se han descrito en el presente documento, debe entenderse que otras variaciones pueden ser posibles dentro del alcance de la invención, que se define en las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Un procedimiento de operación de un reactor refrigerado por metal líquido, que comprende:

5 hacer fluir un refrigerante (102) de metal líquido a un flujo a través de un núcleo del reactor refrigerado por metal líquido a través de un tubo (104) que contiene un absorbedor (106) de neutrones, siendo el tubo más largo que una región (108) activa del núcleo, incluyendo el tubo un extremo (110) superior y un extremo (112) inferior, estando el extremo superior del tubo por encima de la región activa del núcleo, estando el extremo inferior del tubo por debajo de la región activa del núcleo, definiendo el tubo una trayectoria de flujo para el refrigerante de metal líquido, siendo el absorbedor de neutrones una estructura móvil dentro de la trayectoria de flujo; y  
 10 controlar una salida de potencia del reactor refrigerado por metal líquido en base al flujo del refrigerante de metal líquido a través del tubo, el tubo configurado de tal manera que el refrigerante de metal líquido entre en la trayectoria de flujo a través del extremo inferior del tubo y sea guiado hacia arriba más allá del absorbedor de neutrones para salir del extremo superior del tubo, una posición del absorbente de neutrones dentro de la trayectoria de flujo que depende del flujo del refrigerante de metal líquido a través del tubo, **caracterizado porque**  
 15 el tubo (104) comprende además un pestillo (118) en el extremo (110) superior del tubo (104), estando el pestillo configurado para acoplarse al absorbedor (106) de neutrones y para reducir las vibraciones inducidas por el flujo.

2. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que el control incluye una o ambas de aumentar el caudal del refrigerante (102) de metal líquido para aumentar la potencia de salida del reactor refrigerado por metal líquido y / o disminuir el flujo del refrigerante (102) de metal líquido para disminuir la potencia de salida del reactor refrigerado por metal líquido.  
 20

3. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, en el que el control incluye colocar el reactor líquido refrigerado por metal en un estado crítico cuando el flujo del refrigerante (102) de metal líquido es al menos 15 % de un flujo nominal para el reactor refrigerado por metal líquido.

4. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el control incluye mantener una temperatura de salida del núcleo a un nivel constante cuando el reactor refrigerado por metal líquido está en un estado crítico.  
 25

5. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el control incluye colocar el reactor refrigerado por metal líquido en un estado subcrítico cuando el caudal del refrigerante (104) de metal líquido es insuficiente para hacer flotar el absorbedor de neutrones dentro de la trayectoria de flujo.

6. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que el tubo (104) comprende además un muelle (120) en el extremo (110) superior del tubo (104), el muelle configurado para disparar una señal cuando es comprimido por el absorbedor (106) de neutrones, indicando la señal que el absorbedor de neutrones está fuera del núcleo.  
 30

7. Un sistema (100) de parada pasiva para un reactor refrigerado por metal líquido, que comprende:

35 un tubo (104) configurado para extenderse a través de un núcleo del reactor refrigerado por metal líquido, teniendo el tubo un extremo (110) superior y un extremo (112) inferior, definiendo el tubo una trayectoria de flujo para un refrigerante (102) de metal líquido; y  
 un absorbedor (106) de neutrones dentro del tubo, siendo el absorbedor de neutrones una estructura móvil dentro de la trayectoria de flujo y configurado para obstruir parcialmente un flujo del refrigerante (102) de metal líquido más allá del absorbedor de neutrones y dentro de la trayectoria del flujo, **caracterizado porque**  
 40 el tubo (104) comprende además un pestillo (118) en el extremo (110) superior del tubo (104), estando configurado el pestillo para acoplarse al absorbedor (106) de neutrones y para reducir las vibraciones inducidas por el flujo.

8. El sistema (100) de parada pasiva de la reivindicación 7, en el que el tubo (104) se extiende verticalmente desde el extremo (110) superior hasta el extremo (112) inferior.  
 45

9. El sistema (100) de parada pasiva de cualquiera de las reivindicaciones 7 u 8, en el que el tubo (104) está configurado para evitar (114, 116) que el absorbente de neutrones pase a través del extremo (110) superior y el extremo (112) inferior del tubo.

10. El sistema de parada pasiva de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, en el que el tubo está configurado para impedir que (114) una superficie superior del absorbedor (106) de neutrones pase por debajo de una región (108) activa del núcleo.  
 50

11. El sistema (100) de parada pasiva de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, que comprende, además:

un tope (114) inferior en una superficie interna del tubo (104), el tope inferior estando configurado para permitir que el flujo del refrigerante (102) de metal líquido pase por ,y para soportar, un peso del absorbedor (106) de

neutrones cuando el flujo del refrigerante de metal líquido es insuficiente para hacer flotar el absorbedor de neutrones dentro de la trayectoria del flujo.

12. El sistema (100) de parada pasiva de la reivindicación 11, en el que el tope (114) inferior está alineado con un límite inferior de una región (108) activa del núcleo.

5 13. El sistema (100) de parada pasiva de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 12, que comprende, además:

un tope (116) superior en una superficie interior del tubo (104), el tope superior configurado para permitir que el flujo del refrigerante (102) de metal líquido pase por, a la vez que retiene, el absorbedor (106) de neutrones dentro del tubo.

10 14. El sistema (100) de parada pasiva de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 13, en el que la trayectoria del flujo se expande desde el extremo (112) inferior al extremo (110) superior.

15. El sistema (200) de parada pasiva de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 14, que comprende, además:

un muelle (120) en el extremo (110) superior del tubo (104), el muelle estando configurado para disparar una señal cuando es comprimido por el absorbedor (106) de neutrones, la señal indicando que el absorbedor de neutrones está fuera del núcleo.

15

FIG. 1

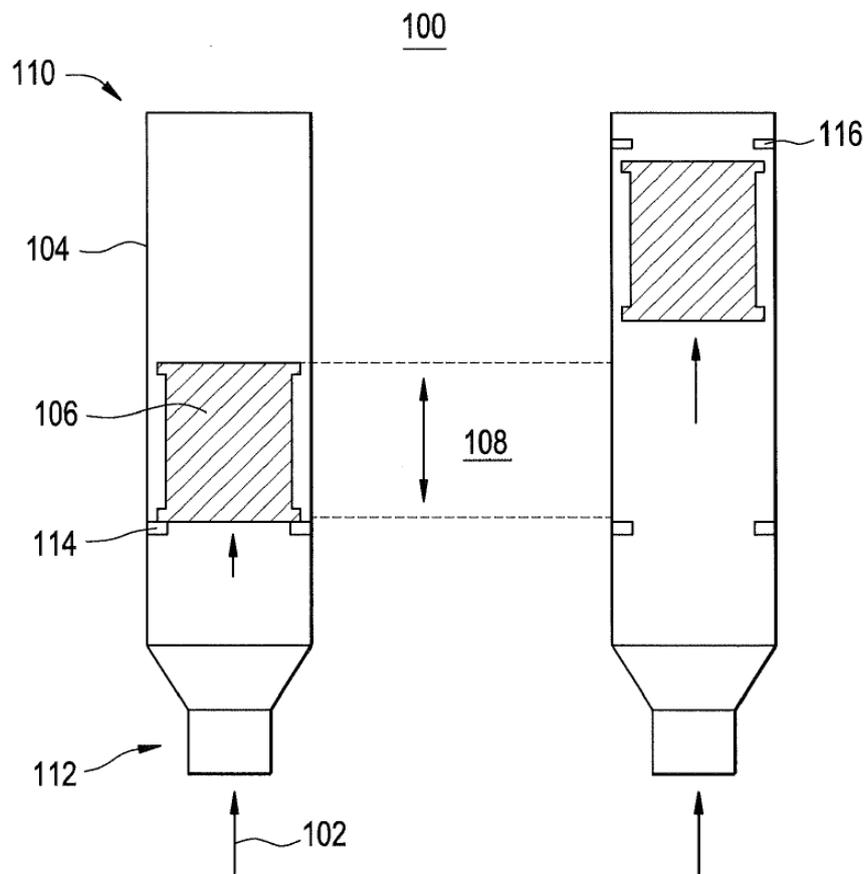


FIG. 2

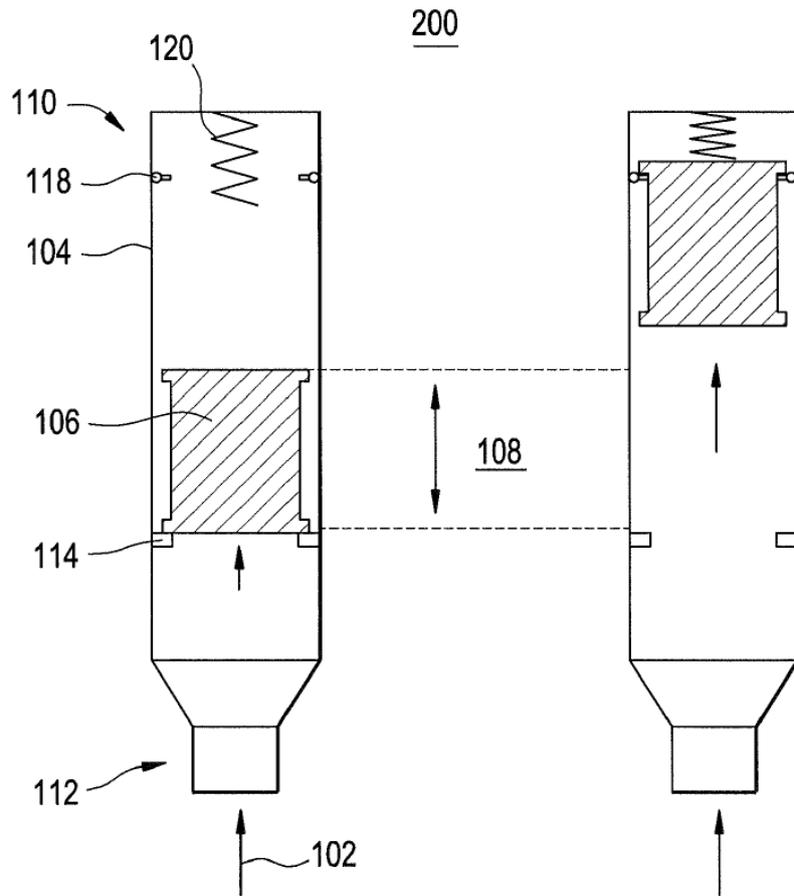


FIG. 3

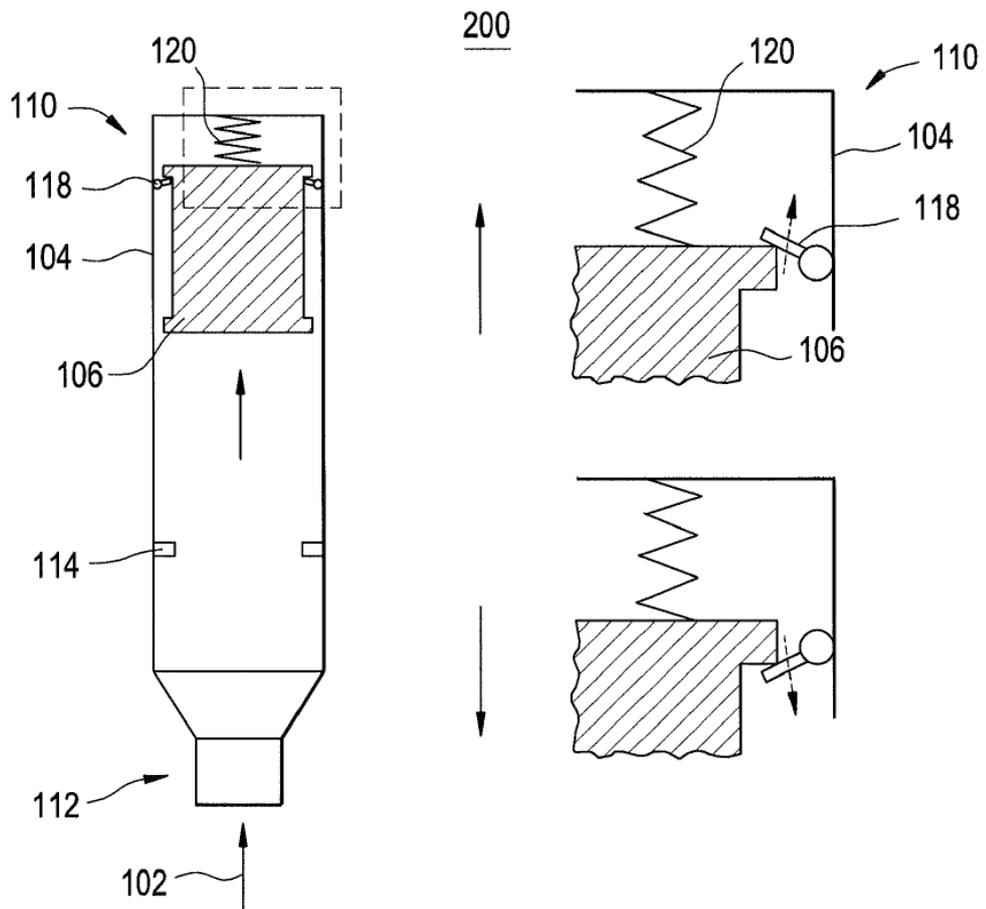


FIG. 4

400

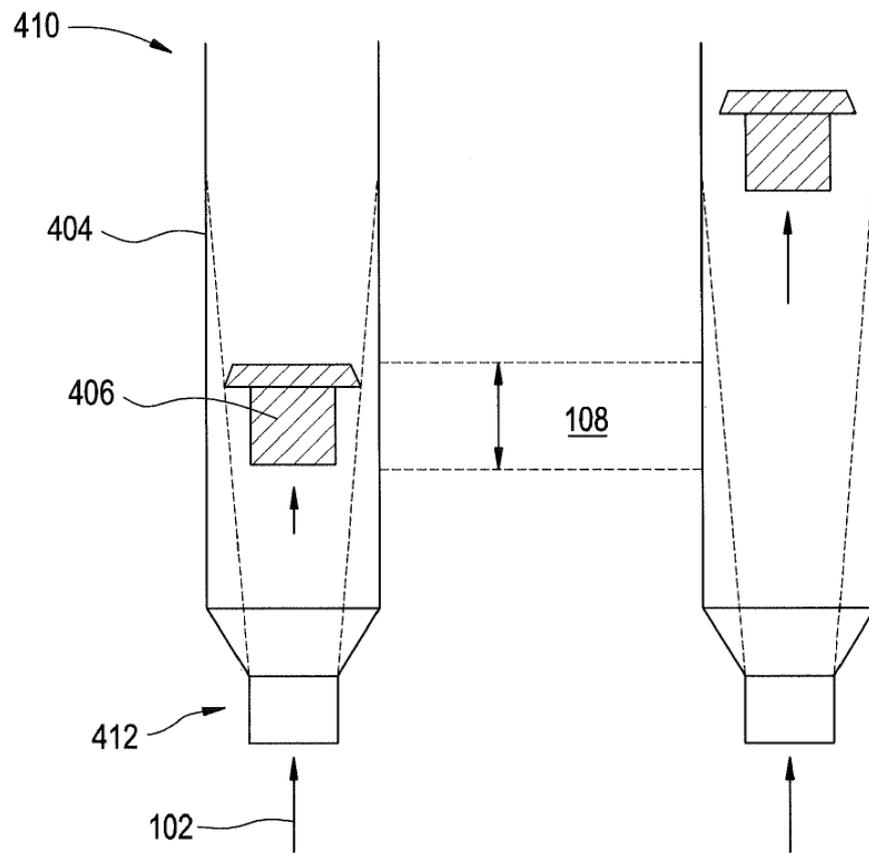


FIG. 5

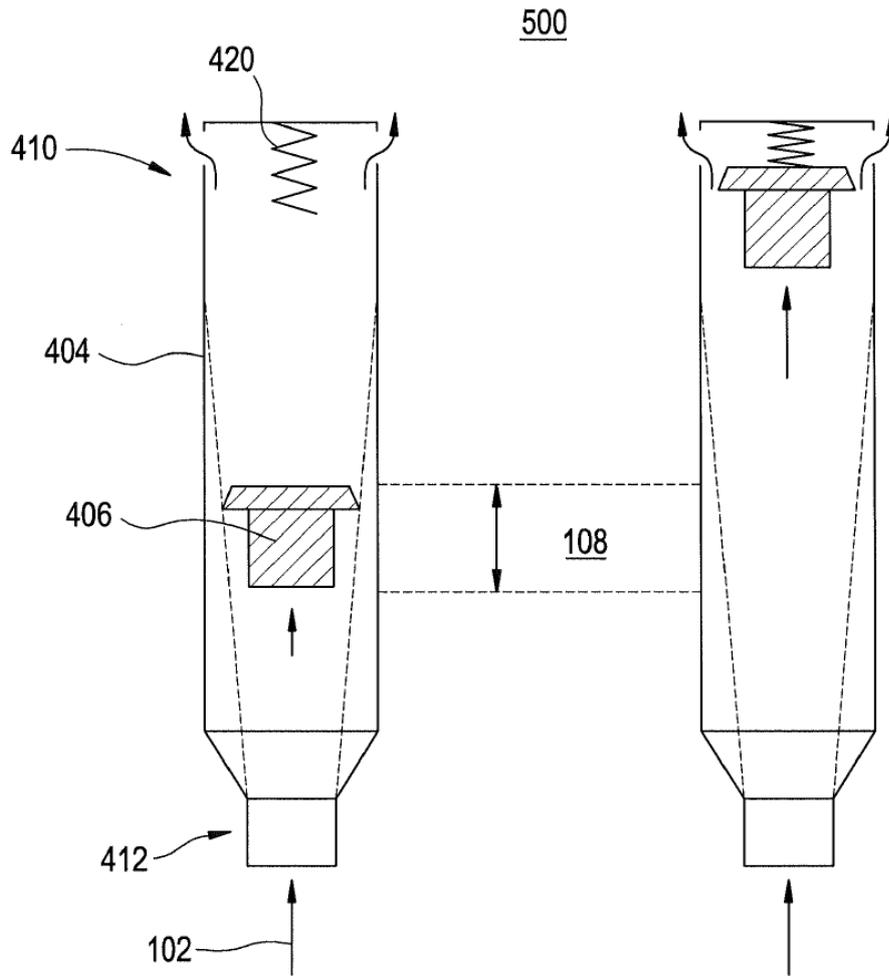


FIG. 6

