

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 665 460**

51 Int. Cl.:

**G21C 17/06** (2006.01)

**G21F 1/08** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.06.2010 PCT/ES2010/070380**

87 Fecha y número de publicación internacional: **16.12.2010 WO10142830**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.06.2010 E 10785781 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.01.2018 EP 2442312**

54 Título: **Escáner para el análisis de una barra de combustible nuclear**

30 Prioridad:

**08.06.2009 ES 200930277**

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

**25.04.2018**

73 Titular/es:

**ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A. (100.0%)  
Santiago Rusinol, 12  
28040 Madrid, ES**

72 Inventor/es:

**RODERO RODERO, JOSÉ, MARÍA y  
ALVAREZ GONZALEZ, PEDRO**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 665 460 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

Escáner para el análisis de una barra de combustible nuclear

### Campo de la invención

5 La presente invención se aplica al campo de los equipos de inspección de combustible nuclear, más en particular, a un escáner de barras de combustible irradiadas.

### Antecedentes de la invención

En los reactores nucleares, se utilizan elementos combustibles que comprenden una pluralidad de barras de combustible nuclear, organizadas en forma de matriz, en filas y columnas. Estas barras incluyen pastillas de combustible, por ejemplo, de uranio (U), en forma de óxido de uranio (UO<sub>2</sub>), normalmente enriquecido en <sup>235</sup>U.

10 Con el fin de estudiar varios parámetros característicos del rendimiento de las barras de combustible (distribución lineal del calor emitido o quemado, emisión de gases producto de la fisión, interacción de los elementos combustibles con las paredes de las barras, etc.) existen diversos dispositivos. En particular, un parámetro importante a tener en cuenta es el quemado, una medición de la cantidad de energía térmica producida en el combustible y que se puede expresar como el número de fisiones por 100 núcleos pesados (masa atómica >=232) presentes inicialmente en el combustible. Las mediciones no invasivas del quemado pueden basarse en la detección por ejemplo de la actividad del isótopo <sup>137</sup>Cs usando detectores de radiación gamma de media o alta resolución. Existen, por ejemplo, detectores de radiación gamma basados en cristales de germanio que se usan para medir la radiación gamma emitida por los elementos combustibles después del uso de los mismos en el reactor nuclear, como el descrito en la publicación "Studies of Nuclear Fuel Performance Using On-site Gamma-ray Spectroscopy and In-pile Measurements, Ingvar Matsson, ISBN 91-554-6582-X".

20 Este detector de germanio requiere refrigeración con nitrógeno líquido, algo que hace que la unidad y su operación sean complejas.

25 Este tipo de mediciones, que pueden incluir una espectrometría, son necesarias para comprobar que el combustible se ha quemado tal y como estaba previsto y hasta el límite predeterminado, algo importante para el tratamiento y almacenamiento posterior del elemento combustible una vez usado.

30 Existen también aparatos para medir y analizar los gases emitidos por las barras de combustible al exterior, como el descrito en la patente FR 2726936 A1. Sin embargo, un parámetro de creciente interés es la concentración de gas en la parte interior más alta de las barras de combustible y donde se sitúa el muelle (impelente), parámetro directamente relacionado con la actividad del combustible durante el quemado. Se hacen necesarios por tanto, dispositivos que faciliten la medición de estas concentraciones de gas en el interior de la barra.

35 Otros dispositivos y configuraciones para la medición de tales concentraciones de gas se divulgan, por ejemplo, en "In situ gamma spectroscopy of spent nuclear fuel using a CdTe detector" de Abbas, Nicolaou, y Koch de 1996; y también, por ejemplo, en el documento FR2880179 A1. En la actualidad además, el coste de los diferentes equipos de medición es elevado, y su transporte y montaje se hace difícil debido a sus grandes dimensiones y al peso del blindaje.

### Objeto de la invención

40 La presente invención tiene por objeto resolver los problemas expuestos anteriormente mediante un escáner tal como se define en la reivindicación 1. El blindaje está hecho preferentemente de un material muy denso y con un alto número atómico, como el wolframio. Los medios de posicionamiento serían orificios en el blindaje y el orificio de la barra. Opcionalmente podría haber varios detectores en orificios correspondientes. Asociados a cada detector puede haber un colimador y/o un filtro para la detección de los isótopos de interés (el isótopo <sup>85</sup>Kr, o los isótopos <sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>154</sup>Eu, <sup>106</sup>Ru o <sup>140</sup>La). Preferentemente, el dispositivo incluye medios motorizados capaces de desplazar la barra en el orificio que le corresponde a una velocidad controlada y un tubo de inserción entre la barra de combustible y su orificio correspondiente. El escáner se puede acoplar a un bastidor de soporte de elementos combustibles en una piscina de almacenamiento temporal mediante una plataforma configurada para tal uso.

45 Gracias al detector de Cd(Zn)Te el dispositivo de la invención es mucho más pequeño que los dispositivos conocidos hasta ahora y además no requiere refrigeración por nitrógeno líquido, lo cual reduce el coste y complejidad del sistema.

50 El dispositivo objeto de la invención presenta además la ventaja de poder realizar distintas mediciones sobre una sola barra con distintos filtros y/o detectores con distintas resoluciones, que son fácilmente intercambiables.

### Breve descripción de las figuras

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de la presente descripción, según una realización práctica preferente de la invención, se adjuntan las siguientes figuras, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo:

La figura 1 muestra una sección vertical de una realización de la invención.

La figura 2 muestra un corte axial de dicha realización.

La figura 3 muestra una vista en perspectiva del aparato colocado en el bastidor de soporte de la piscina del reactor, según una realización de la invención.

5 La figura 4 muestra una sección vertical de una realización con varios detectores.

La figura 5 muestra detalles de los filtros y la región del impelente.

### **Descripción detallada de la invención**

El escáner de barras de la invención realiza una inspección de espectrometría gamma de resolución media mediante un detector de estado sólido. La información suministrada por el escáner de barras debe obtener:

- 10 - la medición de quemado y del tiempo de enfriamiento a partir de la obtención de las mediciones isotópicas de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  y  $^{154}\text{Eu}$ , independientemente de la información previa de la barra
- el perfil de los isótopos de interés  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  y gamma total y en consecuencia el perfil de quemado.
- información milimétrica de la homogeneidad de la columna de pastillas y de su longitud exacta
- 15 - la medición de  $^{85}\text{Kr}$  en el impelente (FGR – Fission Gas Release), utilizada para la medición de la presión dentro de la barra
- el perfil de  $^{140}\text{La}$  en la determinación de potencia al fin de un ciclo (medición a 5 semanas)
- capacidad para determinar contaminación de  $^{60}\text{Co}$  en la zona de pastillas y en el impelente.

20 Esencialmente el escáner de barras obtiene la misma información básica de caracterización que el escáner de alta resolución de Ge del estado de la técnica, incluida la medición de  $^{85}\text{Kr}$ . Además, el sistema de control de posición axial permite en la realización del perfil de la barra, una adquisición sincronizada de la posición con respecto a la radiación gamma de la región de interés, o con respecto a la totalidad de la radiación gamma.

25 El detector es un cristal semiconductor de TeCd, con Zn como impureza, compuesto que se denomina comúnmente CZT. Se necesita un detector que proporcione información válida en el rango de medición hasta 200.000 fotones/segundo, suficientemente eficiente para energías de > 300 keV y capaz de proporcionar resolución suficiente a temperatura ambiente (unos 30°). Los detectores se incorporarán a carcasas estancas presurizadas para trabajar a unos 10 metros bajo el agua. La radiación principal de control puede corresponder al  $^{137}\text{Cs}$  que se selecciona por proporcionar información de quemado con tiempos de enfriamiento >6 meses. Si el tiempo de enfriamiento es inferior podrá realizarse la inspección con un tiempo de enfriamiento adecuado a la medición del  $^{140}\text{La}$  (de 5 a 6 semanas). Este rango de medición en energías del escáner cubre a partir de la energía del  $^{106}\text{Ru}$ . Por tanto cubre la medición del  $^{134}\text{Cs}$ , del  $^{137}\text{Cs}$ , del  $^{154}\text{Eu}$  y del  $^{140}\text{La}$  como se requiere para los objetivos que se pretenden.

30

Las radiaciones medidas entre 500 y 1500 keV son necesarias para determinar el quemado con un enfriamiento entre 6 meses y 100 años. Tras la operación en reactor con una energía específica por encima de 10 Mwd/TnU, para quemados inferiores deberían prolongarse significativamente los tiempos de medición.

35 Los detectores de CZT probados cumplen con estas especificaciones y requerimientos. La medición de  $^{85}\text{Kr}$  con el escáner de barras proporcionará la presión parcial de  $^{85}\text{Kr}$  en la región del muelle cuando se disponga de unos patrones de calibración de geometría, rango de concentración y constitución equiparables en todo a las barras analizadas, la medición se realiza en un punto de la región del impelente en que, por su alejamiento del combustible, no son esperables la presencia de isótopos que generen interferencia en la medición, en cualquier caso, la ausencia de tales isótopos es demostrable por la propia técnica.

40

El detector o detectores van colocados en un blindaje de wolframio, según se puede ver en las figuras, estando colimados por un orificio o ranura. En un orificio perpendicular al anterior se coloca la barra a analizar con el fin de optimizar la posición relativa del detector y la zona de interés de la barra. En la figura 1 se puede apreciar la región del impelente (4) y la región de las pastillas (3).

45 El analizador de espectros distingue las emisiones de los isótopos de interés:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  y  $^{140}\text{La}$ , de forma que su medición se corresponda con la abundancia de los mismos en la barra. En la medición podrán incorporarse filtros que realizan una absorción selectiva de la radiación que llega al detector.

50 El escáner de la invención proporciona la máxima información relevante en condiciones de seguridad con un coste de montaje y operación limitados, es decir, perfilometría axial de quemado, de anomalías en la columna de pastillas, concentración de  $^{85}\text{Kr}$  en la región del muelle y análisis de espectros de isótopos de interés en posiciones axiales fijas e identificadas con un control de posición axial.

El sistema propuesto realiza una caracterización gamma completa de la barra en media resolución con un control estático de la distancia detector/barra y con el registro en fichero de la ubicación axial y el tiempo transcurrido desde el inicio. De esta forma se asegura la precisión en las mediciones y se reduce la variabilidad.

55 La barra se coloca en el equipo mediante una herramienta auxiliar motorizada autónoma de manejo de barra, que proporciona una ubicación segura interfiriendo mínimamente con el trabajo en la piscina del combustible. La

herramienta que sujeta la barra tiene un elemento pinza que sirve para coger la barra en una posición segura, la herramienta introduce la barra en el escáner (figura 1) a través de un orificio (8) con un elemento de guía o embudo (9), y tiene un sistema que permite variar y controlar la velocidad para ajustarla a la requerida por la inspección. Preferentemente, el sistema de avance autónomo de la barra es de tornillo sin fin con control de velocidad digitalizado. La herramienta se puede colocar anclada en el borde de la piscina de la central o bien mediante un polipasto que está suspendido de la estructura o bien de la propia grúa manipuladora de la piscina de combustible. Este sistema permite la automatización del proceso eliminando la intervención del operador, e incorporando secuencias de auto chequeo.

El movimiento de la barra es a una velocidad controlada a través de los detectores y colimadores (6), cuyo número puede variar según las necesidades (ver figuras 1 y 4), en principio sin límite, controlándose la posición de los detectores respecto a la altura de la barra. Esta posición se asocia a la señal de los detectores. La inmovilización de cada detector en una posición fija y reproducible está garantizada por el diseño mecánico (ver figuras).

El sistema realiza una perfilometría gamma de la región de interés (ROI) del  $^{137}\text{Cs}$  o de cualquier otro isótopo emisor gamma penetrante, con adquisición simultánea de espectros gamma de media resolución, para discriminación de los isótopos, por ejemplo  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  y  $^{154}\text{Eu}$ . El equipo permite la selección del colimador (7) a utilizar en cada inspección, adaptado a las características de la barra, a la perfilometría, a la optimización del tiempo muerto y a la minimización del pico de aniquilación generado por la interacción de la radiación del  $^{60}\text{Co}$  en la medición de la región del impelente  $^{85}\text{Kr}$ .

El dispositivo incorpora también un sistema de medición en la región del impelente que permite la determinación del isótopo  $^{85}\text{Kr}$  para determinar la presión interna de la barra, mediante la aplicación de métodos computacionales que sustraen la influencia de la radiación que proviene del material de la barra y del muelle (ver figura 1).

El procesado de la señal de los detectores se realiza mediante dispositivos en línea como osciloscopios digitales y analizadores multicanal. El conjunto detector/electrónica permite la evaluación inmediata del grado de quemado y una comparación con el límite de aceptación. El sistema presenta en pantalla el resultado de la inspección mediante el procesado de las señales de los detectores, indicando los parámetros tales como la concentración de actividad de  $^{85}\text{Kr}$ , grado de quemado y grado de enfriamiento, longitud de columna de pastillas y perfil con información de la medición que permite su completa verificación. El analista de radiometría se limita únicamente a una labor de supervisión del proceso y de identificación de la barra en el sistema. Se supervisa en pantalla las indicaciones de posición, tiempo transcurrido, espectros gamma en tiempo real y cps de los perfiles gamma. En suma, no hay intervención de operadores en el proceso de medición del equipo de inspección, a excepción del movimiento de la barra hasta el escáner.

Para las mediciones relacionadas con la región de pastillas de combustible, el/los detectores, pueden ser de CZT de  $5\text{ mm}^3$  u otro similar, que proporciona pulsos rápidos de manera que se hace posible la perfilometría en tiempos de recuento razonables y los espectros obtenidos permiten una discriminación inmediata entre los isótopos de referencia. El colimador, que puede estar hecha de wolframio u otro material equivalente, dispone del filtro con rendija para perfilometría a partir de  $\sim 0,5\text{ mm}$  y se diseña con el grosor adecuado para minimizar la radiación dispersa. Se incorpora además un filtro, que puede estar hecho también de wolframio u otro material de alto Z, para reducir en lo posible los pulsos de energía inferiores a  $500\text{ keV}$  en el procesador. Se maximiza por tanto el tipo de impulsos que llegan al procesador digital portando información de interés y se optimiza así el tiempo de recuento al reducir el tiempo muerto y la radiación dispersa.

Para las mediciones en la región del impelente se incorporan detectores de media resolución, que pueden ser de CdZnTe (CZT) de  $10\text{ mm}^3$  u otro similar que proporcionan pulsos rápidos de manera que se hace posible la medición del pico de  $^{85}\text{Kr}$  en tiempos de recuento razonables. Los espectros así obtenidos permiten una adecuada capacidad de discriminación. El colimador puede estar hecho de wolframio u otro material equivalente y se diseña, al igual que se ha comentado anteriormente en el caso de la región de pastillas, con el grosor idóneo para minimizar la radiación dispersa. Se puede incorporar además un filtro, que también puede estar hecho de wolframio u otro material de alto Z, para reducción de los pulsos de energía inferiores a  $400\text{ keV}$ , maximizando el tipo de impulsos que llegan al procesador digital portando información de interés y optimizándose el tiempo de recuento al reducir el tiempo muerto y la radiación dispersa. La medición relacionada con el isótopo  $^{85}\text{Kr}$  permite determinar la presión interna de la barra mediante la aplicación de métodos computacionales de substracción de la radiación que proviene del material de la barra y muelle.

Una ventaja adicional del equipo es que permite realizar numerosos ajustes según las mediciones que se deseen realizar: insertar casquillos colimadores adaptados a la geometría de la barra, interpolar filtros de diferentes características y alejar el detector de la barra para los casos en los que la sensibilidad del detector lo requiera. El blindaje permite la fácil incorporación de filtros de diferentes espesores de acuerdo a los requerimientos de la medición de barras de diferentes geometrías, grados de quemado o grados de enfriamiento. También se pueden realizar mediciones de barras con distintas geometrías, gracias a que es posible introducir en el orificio de la barra distintos tubos de inserción.

El dispositivo puede llevar incorporado un codificador de la posición axial integrándose esta información con la

correspondiente a los detectores activos que escanean cada uno a diferente altura de la barra una banda estrecha del plano horizontal.

5 El blindaje común que contiene los detectores y colimador es estanco y está presurizado. Para la realización de perfiles la posición axial y cada medición es simultáneamente registrada de forma sincronizada desde el inicio hasta el final de la columna de pastillas (desde el contacto de la pastilla combustible con el tapón inferior de la barra hasta el contacto de la pastilla combustible con el muelle del impelente de la barra).

En el ejemplo preferencial de la figura 4, se incorporan 3 analizadores gamma que se componen de 3 detectores de CZT a temperatura ambiente (de volumen sensible de 1 a 60 mm<sup>3</sup>) y 3 colimadores de wolframio integrados en un blindaje común con ventanas de ranura o cónicas adaptadas a las inspecciones que se vayan a llevar a cabo.

10 Así se podrá disponer de dos colimadores/detectores adecuados a la medición de <sup>85</sup>Kr en el impelente con objeto de obtener una información doblemente contrastada de dicha determinación y de un colimador/detector para medir el perfil y quemado de la región de pastillas.

15 Opcionalmente, en vez de dos detectores para la medición del <sup>85</sup>Kr, se puede disponer un colimador/detector adecuado a la medición de <sup>85</sup>Kr en el impelente, de un colimador/detector para medir el perfil y quemado de la región de pastillas y de un colimador/detector adecuado para medir anomalías en la columna de pastillas.

En suma, es posible preconfigurar la disposición de los colimadores/detectores adaptándose a las necesidades de cada momento con el objetivo de no tener que sacar el equipo del agua.

20 En la figura 3 se puede observar cómo la plataforma que soporta el blindaje, en su parte inferior, está dotada de una estructura configurada para permitir que ella misma pueda acoplarse en un bastidor de soporte para elementos combustibles en una piscina de almacenamiento.

El dispositivo de la invención no requiere suministro de nitrógeno, el blindaje es ligero, sencillo de instalar, operar y mantener. Otras ventajas del dispositivo son que permite la realización de la medición desde casi cualquier grado de enfriamiento y grado de quemado. También es posible variar la geometría de la barra, gracias a que es posible introducir en el orificio de la barra distintas guías.

25 La invención no está limitada a las realizaciones concretas que se han descrito sino que abarca también, por ejemplo, las variantes que pueden ser realizadas por el experto en la materia (por ejemplo, en cuanto a la selección de materiales, dimensiones, componentes, configuración, etc.), dentro de lo que se desprende de las reivindicaciones.

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Escáner para el análisis de una barra de combustible nuclear (2), que comprende al menos un detector (6), un blindaje (1) de un material capaz de proteger contra la radiación y medios de posicionamiento de la barra y medios de posicionamiento de dicho al menos un detector (6), en el que el detector está constituido por TeCd dopado con Zn u otro semiconductor de características similares y los medios de posicionamiento de la barra y del detector están situados uno respecto al otro de manera que permiten la detección de isótopos de interés y **caracterizado porque** los medios de posicionamiento del al menos un detector comprenden al menos un orificio (5) para recibir el detector (6) y otro orificio (8) para recibir la barra, en el que los medios de posicionamiento de la barra y los medios de posicionamiento del al menos un detector están situados en el blindaje.
- 10 2. Escáner según la reivindicación 1, **caracterizado porque** el blindaje (1) está hecho de un material muy denso de alto número atómico.
3. Escáner según la reivindicación 2, **caracterizado porque** el blindaje (1) está hecho de wolframio.
- 15 4. Escáner según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** dichos medios de posicionamiento de la barra comprenden además un elemento de guía (9) para la barra, situado en el blindaje, con el fin de facilitar la inserción de la barra en su orificio.
5. Escáner según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** comprende varios detectores (6) y los medios de posicionamiento de los detectores comprenden un orificio (5) para cada detector (6).
6. Escáner según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el/los detector/detectores incorporan un filtro (7) para determinados isótopos.
- 20 7. Escáner según la reivindicación 6, **caracterizado porque** el conjunto filtro-detector (7) es capaz de detectar el isótopo  $^{85}\text{Kr}$ , o los isótopos  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  o el isótopo  $^{140}\text{La}$ .
8. Escáner según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** además incorpora un colimador por cada detector adaptado al isótopo o isótopos a medir.
- 25 9. Escáner según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** comprende medios motorizados capaces de desplazar la barra en su orificio correspondiente a una velocidad controlada.
10. Escáner según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** comprende un tubo de inserción entre la barra de combustible (2) y su orificio correspondiente (8).
- 30 11. Escáner según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** comprende una plataforma (11) configurada para acoplar el aparato (1) a un bastidor de soporte (10) de elementos combustibles en una piscina de almacenamiento temporal de elementos combustibles.

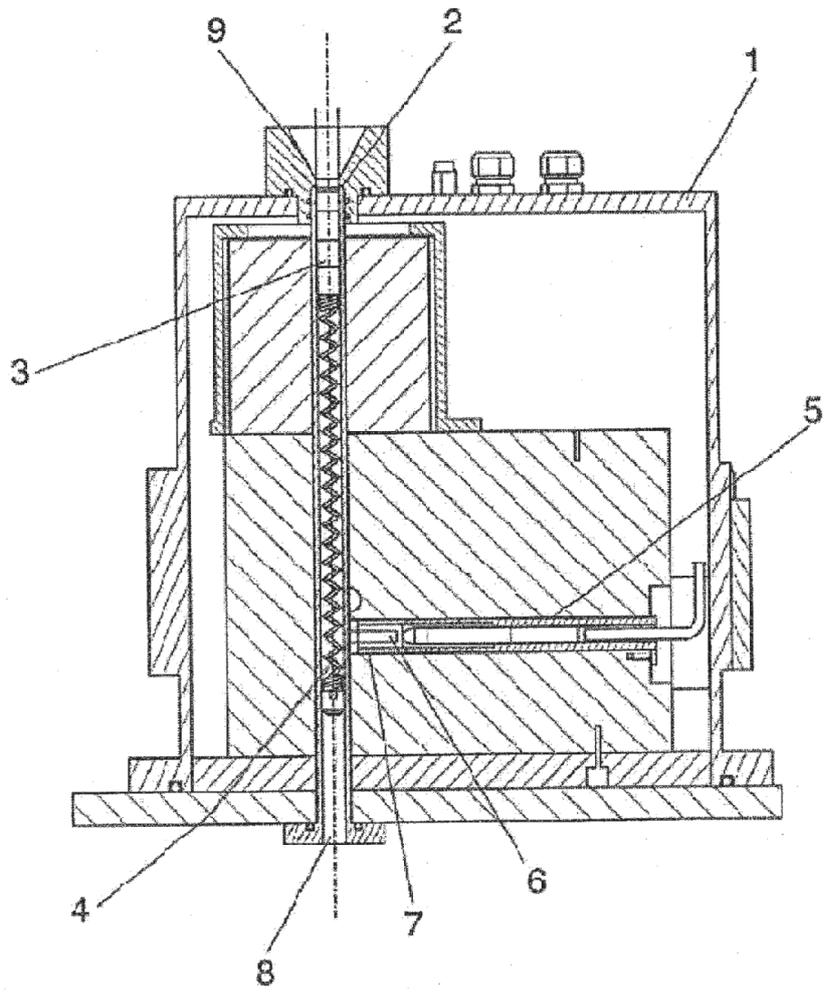


FIG. 1

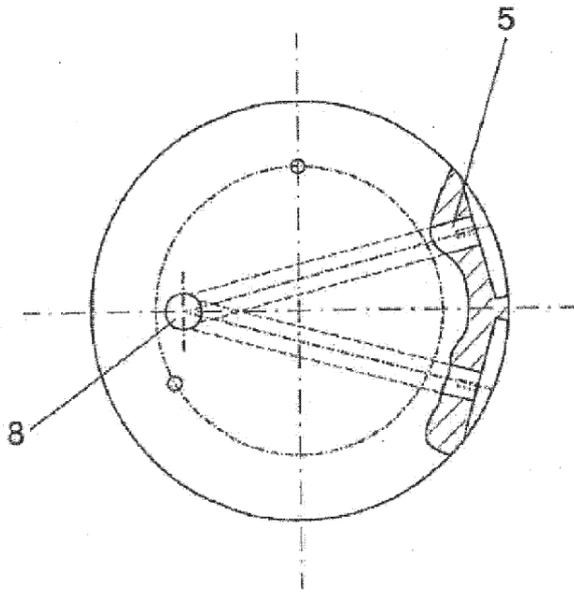


FIG. 2

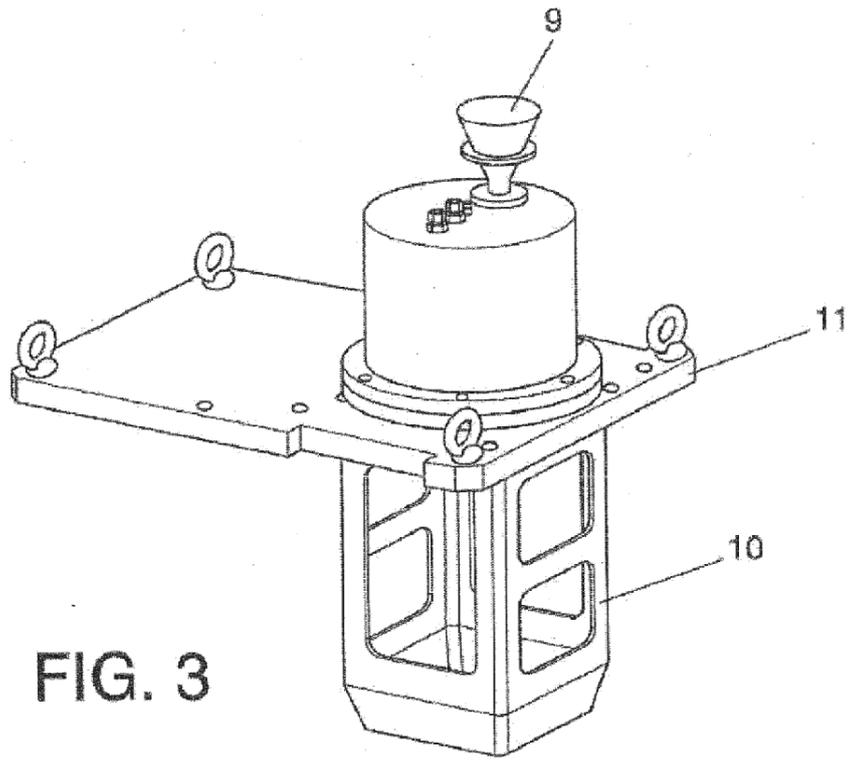


FIG. 3

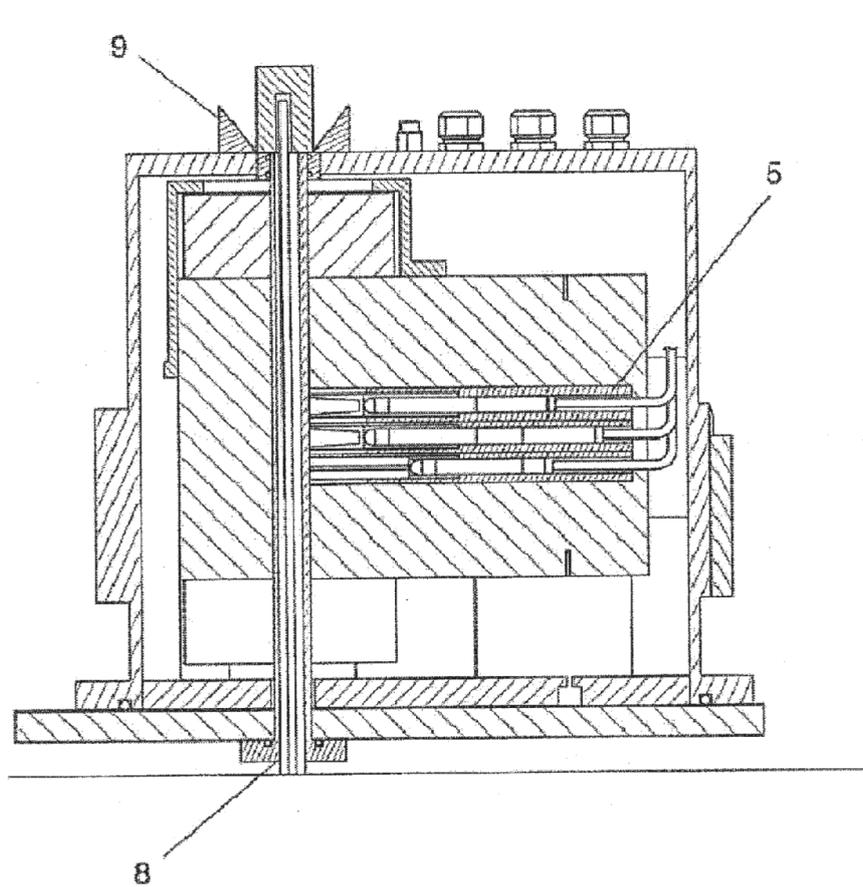


FIG. 4

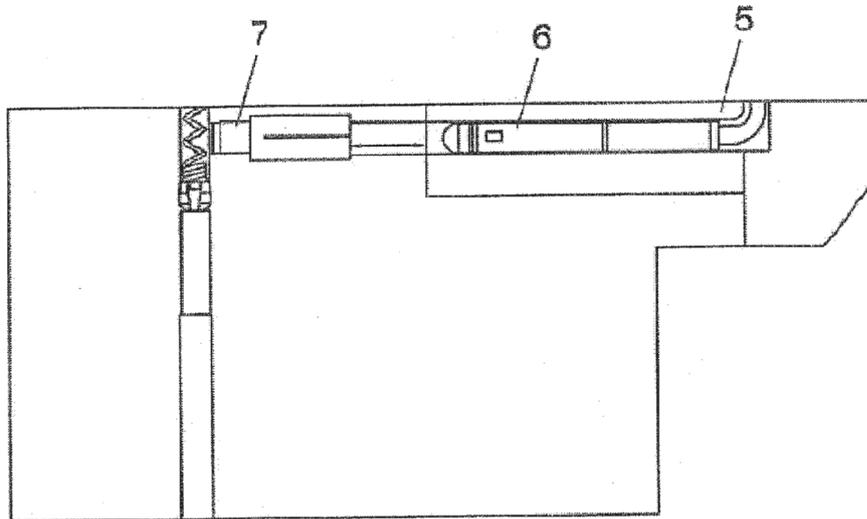


FIG. 5