

CALENTADOR ELÉCTRICO

CAMPO DE LA DIVULGACIÓN

[0001] Las formas de realización de la presente divulgación se refieren en general a unidades de deshidrogenación de parafinas tales como CATOFIN®. Uno de los modos de suministrar calor de reacción es un calentador de aire. En la actualidad, las plantas utilizan principalmente calentadores de aire alimentados con combustible que generan emisiones asociadas a la combustión. Esta divulgación sustituye el calentador de combustión por un calentador eléctrico para reducir el combustible quemado. La creciente disponibilidad de energías renovables puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la tecnología CATOFIN®.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

[0002] En WO2020245016A1 se divulgan uno o más procesos que consumen calor ($>500\text{ }^{\circ}\text{C}$), al menos uno de los cuales se calienta eléctricamente. Los productos del proceso de consumo de calor se transfieren a una red de transporte de energía con una capacidad de 5 GWh.

[0003] En US9908091B2 se describe un horno para el reformado de vapor que incluye al menos un quemador y al menos una fuente de tensión conectada a los tubos del reactor. Se hace pasar una corriente a través de los tubos del reactor para calentar la materia prima.

[0004] En US20210254774A1 se describe un reformador de vapor con una cámara de combustión que contiene tubos reactores. En el interior de los tubos del reactor se coloca un elemento de calentamiento.

[0005] En US20210051770A1 se divulga un aparato eléctricamente calentable que contiene sólidos para reacciones endotérmicas, incluida la deshidrogenación de propano (enumerado, pero no descrito en detalle). El lecho compactado está dividido en secciones superior, media e inferior que están aisladas eléctricamente. El calentamiento se realiza mediante electrodos instalados en una empaquetadura de estado sólido conductora de la electricidad.

[0006] En US20210171344A1 se divulga un reactor de reformado de vapor con una estructura macroscópica que soporta un revestimiento de catalizador. Se hace pasar una corriente a través de la estructura macroscópica para calentar parte del catalizador a $>500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

[0007] En un aspecto, las formas de realización divulgadas en la presente se refieren a un proceso para regenerar un catalizador en un reactor de producción de olefinas. El proceso incluye alimentar una corriente de aire comprimido precalentado a una zona de calentamiento que comprende un calentador eléctrico, calentar eléctricamente la corriente de aire comprimido precalentado en la zona de calentamiento a una temperatura comprendida en el rango de $500\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$, producir una corriente de aire de regeneración, alimentar la corriente de aire de regeneración al reactor de producción de olefinas, regenerar el catalizador mediante el uso del aire de regeneración, producir una corriente de aire caliente, y alimentar la corriente de aire caliente a una unidad de recuperación de calor

residual configurada para precalentar una corriente de aire comprimido, producir la corriente de aire comprimido precalentado y una corriente de aire residual.

[0008]En otro aspecto, las formas de realización divulgadas en la presente se refieren a un calentador eléctrico para calentar una corriente de aire. El calentador eléctrico incluye uno o más elementos de calentamiento eléctricos dispuestos en una sección radiante calentada eléctricamente, una o más características de aumento de área de superficie fijadas al uno o más elementos de calentamiento, un material refractario cerámico configurado para adsorber un calor radiante del uno o más elementos de calentamiento eléctricos y transferir el calor a la corriente de aire por convección, y uno o más elementos de calentamiento dispuestos en una sección de convección calentada eléctricamente, en donde la sección de convección calentada eléctricamente está situada corriente arriba de la sección radiante calentada eléctricamente. El calentador eléctrico está configurado para calentar la corriente de aire a una temperatura comprendida en el rango de 500-800 °C.

[0009]En otro aspecto, las formas de realización divulgadas en la presente se refieren a un sistema para regenerar un catalizador en un reactor de producción de olefinas. El sistema incluye una zona de calentamiento que comprende un calentador eléctrico configurado para recibir una corriente de aire comprimido precalentado y calentar eléctricamente la corriente de aire comprimido precalentado a una temperatura en el rango de 500-800 °C, lo que produce una corriente de aire de regeneración, una línea de flujo configurada para alimentar la corriente de aire de regeneración al reactor de producción de olefinas, donde la corriente de aire de regeneración regenera el catalizador y produce una corriente de aire caliente, y una unidad de recuperación de calor residual configurada para precalentar una corriente de aire comprimido mediante el uso de la corriente de aire caliente, lo que produce la corriente de aire comprimido precalentado y una corriente de aire residual.

[0010]Otros aspectos y ventajas del objeto reivindicado serán aparentes a partir de la siguiente descripción y las reivindicaciones adjuntas.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

[0011]A continuación, se describirán en detalle algunas formas de realización específicas de la tecnología divulgada con referencia a las figuras adjuntas. Para mayor consistencia, los elementos similares de las distintas figuras se indican con números de referencia similares. El tamaño y las posiciones relativas de los elementos de los dibujos no están necesariamente dibujados a escala. Por ejemplo, las formas de varios elementos y ángulos no están necesariamente dibujados a escala, y algunos de estos elementos pueden ampliarse y colocarse arbitrariamente para mejorar la legibilidad del dibujo.

[0012]La Figura 1 ilustra un diagrama de flujo de proceso simplificado de sistemas y procesos de acuerdo con una o más formas de realización divulgadas en la presente.

[0013]La Figura 2 ilustra un diagrama de flujo de proceso simplificado de sistemas y procesos de acuerdo con una o más formas de realización divulgadas en la presente.

[0014] Las Figuras 3(A-G) ilustran un diagrama de flujo de proceso simplificado de sistemas y procesos de acuerdo con una o más formas de realización divulgadas en la presente.

[0015] La Figura 4 ilustra un diagrama de flujo de proceso simplificado de sistemas y procesos de acuerdo con una o más formas de realización divulgadas en la presente.

[0016] La Figura 5 ilustra un diagrama de flujo de proceso simplificado de sistemas y procesos de acuerdo con una o más formas de realización divulgadas en la presente.

[0017] La Figura 6 ilustra un diagrama de flujo de proceso simplificado de sistemas y procesos de acuerdo con una o más formas de realización divulgadas en la presente.

[0018] La Figura 7 ilustra un diagrama de flujo de proceso simplificado de sistemas y procesos de acuerdo con una o más formas de realización divulgadas en la presente.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

[0019] Ahora se ha descubierto que se puede proporcionar una forma particularmente adecuada de calentamiento eléctrico cuando el al menos un elemento de calentamiento es un elemento de calentamiento basado en resistencia. El calentamiento por resistencia eléctrica es un método muy conocido para convertir la energía eléctrica en calor. Esta tecnología se utiliza en muchas otras aplicaciones industriales. El calentamiento por resistencia a alta temperatura ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) se utiliza, por ejemplo, en la industria del vidrio, la industria metalúrgica y muchas instalaciones de laboratorio. Si se considera un sistema aislado, la conversión de energía en calor mediante calentamiento por resistencia tiene una eficacia cerca de 100 %. El calentamiento por resistencia se produce mediante el "efecto Joule". La primera ley de Joule establece que la potencia (P) de calentamiento generada por un conductor eléctrico es proporcional al producto de su resistencia por el cuadrado de la corriente ($P=I^2R$, en donde I es la corriente y R la resistencia).

[0020] Existen muchos tipos diferentes de resistencias eléctricas, cada una con su propósito de aplicación específico. Por ejemplo, la tecnología de cables con aislamiento mineral puede utilizarse para determinadas aplicaciones, aunque su uso es limitado.

[0021] Los elementos de calentamiento de níquel-cromo (NiCr) se utilizan en muchos hornos industriales y electrodomésticos. El material es robusto y reparable (soldable), y está disponible a costos medios y en varios grados. Sin embargo, el uso del NiCr está limitado por una temperatura máxima de funcionamiento de $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, teniendo en cuenta la vida útil de los elementos de calentamiento.

[0022] Otra opción para su uso en la configuración del reactor y la aplicación de alta temperatura de la presente divulgación son los elementos de calentamiento de carburo de silicio (SiC). Los elementos de calentamiento de SiC pueden alcanzar temperaturas de hasta $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ y pueden tener diámetros grandes (disponibles en el comercio hasta 55 mm), lo que permite un alto rendimiento calentador por elemento. Además, los costos de los elementos de calentamiento de SiC son

relativamente bajos.

[0023] Una o más formas de realización de elementos de calentamiento eléctricos pueden ser elementos de calentamiento de resistencia basados en MoSi₂ o FeCrAl.

[0024] Los elementos disilicidas de molibdeno (MoSi₂) tienen la capacidad de resistir la oxidación a altas temperaturas. Esto se debe a la formación de una fina capa de cristal de cuarzo en la superficie. Se necesita una atmósfera ligeramente oxidante (>200 ppm de O₂) para mantener la capa protectora sobre los elementos. Después de haber estado en funcionamiento, los elementos se vuelven muy quebradizos en condiciones de frío y, por lo tanto, se dañan con facilidad. Los elementos de calentamiento de MoSi₂ están disponibles en varios grados hasta 1850 °C, lo que permite su uso en un amplio rango de procesos de conversión de gases a alta temperatura. La resistividad eléctrica de los elementos es una función de temperatura. Sin embargo, la resistencia de estos elementos no cambia con el envejecimiento. Solamente se produce una ligera reducción de la resistencia durante el primer período de uso. Por consiguiente, los elementos averiados pueden sustituirse sin que ello afecte a los demás elementos conectados cuando se instalan en serie. Una ventaja de los elementos de MoSi₂ es la elevada carga superficial de hasta 35 W/cm².

[0025] Otra aleación que puede utilizarse es FeCrAl (Fecralloy). El alambre de resistencia FeCrAl es una tecnología de calentamiento robusta. El funcionamiento puede controlarse mediante un mando encendido/apagado relativamente sencillo. En teoría, pueden aplicarse voltajes elevados para cumplir la función de calentamiento. Sin embargo, esto no se aplica habitualmente, ya que supone una carga adicional para los conmutadores eléctricos y requiere un material refractario adecuado para proporcionar un aislamiento eléctrico suficiente. Los elementos de calentamiento de Fecralloy tienen una vida útil y unas propiedades de rendimiento favorables. Es capaz de funcionar a temperaturas relativamente altas (hasta alrededor de 1300 °C) y tiene una buena carga superficial (5 W/cm²). En algunas formas de realización, los elementos de calentamiento de Fecralloy se utilizan en una atmósfera oxidante (>200 ppm de O₂) para mantener una capa protectora de Al₂O₃ en los elementos.

[0026] Las formas de realización de la presente se refieren a calentadores de aire industriales grandes novedosos para su uso en varios procesos, que incluye, entre otros, los ejemplos siguientes: tecnologías de deshidrogenación CATOFIN® y CATADIENE®, sistemas de regeneración de catalizadores que requieren aire caliente, intercambiadores de calor regenerativos (procesos donde el calor se almacena en un medio de almacenamiento térmico, por ejemplo, rocas, sal, etc.).

[0027] Las formas de realización de la presente también se refieren a procesos y sistemas que permiten aplicar los novedosos calentadores eléctricos a otros procesos con fluidos distintos del aire en los que es conveniente electrificar los calentadores en un esfuerzo por alcanzar objetivos de sostenibilidad y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, o por otros motivos.

[0028] Las normativas gubernamentales, la presión pública y los objetivos de sostenibilidad están impulsando las plantas petroquímicas a reducir las emisiones

de gases de efecto invernadero. Un área de enfoque son los calentadores eléctricos a gran escala frente a los calentadores de combustión. Una o más formas de realización de la presente pueden permitir un cambio a fuentes de energía renovables en lugar de combustibles fósiles utilizados en los calentadores de combustión. Las formas de realización pueden aplicarse a proyectos de nueva construcción, pero también a la modernización de instalaciones que deban reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero para cumplir una normativa cada vez más estricta.

[0029] Consultar la Figura 1 para obtener una visión general del actual sistema de aire de regeneración del reactor 10 CATOFIN®. El reactor 10 CATOFIN® requiere aire caliente de regeneración 12 a alrededor de 500-800 °C para quemar el coque del catalizador y calentar el lecho catalítico, que impulsa la reacción de deshidrogenación. El proceso consiste en un compresor de aire 14, un calentador de aire de regeneración por combustión 16, los reactores 10 CATOFIN®, un intercambiador de recuperación de calor residual 18 y una chimenea 20. Se comprime una corriente de aire 22 a alrededor de 2,0-3,0 bares para transportarla a través del sistema de regeneración. Luego, el aire comprimido 24 se precalienta en el intercambiador de recuperación de calor residual 18 a alrededor de 300-500 °C. El aire precalentado 26 se vuelve a introducir a través del intercambiador de recuperación de calor residual 18 y, a continuación, se calienta en el calentador de regeneración por combustión 16 a 600-800 °C, con una absorción de calor que varía entre 30-300 MW, dependiendo del índice de producción de la planta y de las condiciones de funcionamiento, con una fuente de combustible rica en hidrógeno 28 (un subproducto de la planta) complementada con gas natural y propano. Luego, el efluente 12 del calentador de aire de regeneración por combustión alimenta los reactores 10 CATOFIN®, donde se quema el coque y se calienta el catalizador para recuperar el calor perdido debido a la reacción endotérmica de deshidrogenación. Luego, el aire calentado 30 fluye desde los reactores 10 CATOFIN® hasta el intercambiador de recuperación de calor residual 18, donde el aire se enfría a alrededor de 80-120 °C, lo que produce una corriente de aire frío 32. Luego, la corriente de aire frío 32 sale por la chimenea 20. El intercambiador de recuperación de calor residual 18 recupera energía del efluente de aire del reactor CATOFIN® 30, al precalentar el aire comprimido 24, lo que genera vapor de alta presión 34, y vapor de alta presión sobrecalentado 36. Un tambor de extracción 38 introduce agua 40 al intercambiador de recuperación de calor residual 18 para producir vapor de fase mixta mediante un diseño de termosifón, que vuelve al tambor de extracción 38. Luego, el vapor de alta presión generado en 38 se mezcla con otras fuentes de vapor de alta presión 44 y se envía al intercambiador de recuperación de calor residual 18, donde se sobrecalienta, y después se introduce al desrecalentador 42 y, a continuación, se introduce al intercambiador de recuperación de calor residual 18, donde produce vapor sobrecalentado 36.

[0030] Cabe señalar que el reactor 10 CATOFIN® funciona de forma cíclica, de manera tal que la deshidrogenación y la regeneración/calentamiento se produzcan en momentos distintos.

[0031]En el proceso CATOFIN® actual, el efluente 12 del calentador de combustión 16 contendrá algunas emisiones de CO₂ debido a la combustión de combustibles de hidrocarburos para calentar el aire. Para reducir las emisiones de CO₂, los inventores realizaron una búsqueda de los calentadores de aire eléctricos disponibles de los principales proveedores. El resultado del estudio es el siguiente:

[0032]Para calentar el aire eléctricamente a 600-800 °C, el aire fluye sobre paquetes de elementos eléctricos. Los elementos pueden ser alambres resistivos de NiCr incorporados en un aislamiento de MgO envuelto en una cubierta metálica. Luego, se resumen los problemas detectados en los paquetes de elementos eléctricos existentes.

[0033]Se necesitarían muchos calentadores. Los calentadores existentes son de escala <5 MW, demasiado pequeños para su uso en una planta comercial de olefinas.

[0034]La longitud total del elemento es muy larga, lo cual da como resultado un coeficiente de transferencia de calor deficiente y que no se puedan alcanzar temperaturas de hasta 800 °C. Debido a la longitud del elemento, el volumen total del calentador también es muy grande.

[0035]En general, la longitud del elemento, el volumen total del calentador necesario y la pequeña escala de los calentadores existentes los hacen poco prácticos para su uso en plantas de olefinas a escala comercial. La ineficacia de la transferencia de calor y la necesidad de múltiples calentadores en serie para alcanzar las temperaturas requeridas hacen que el costo y el espacio necesario para el calentamiento sean simplemente demasiado grandes e indeseables.

[0036]Los presentes inventores han diseñado calentadores eléctricos que pueden ser útiles para calentar eléctricamente el aire de regeneración de plantas comerciales de olefinas, entre otros usos industriales a gran escala. La integración de calentadores eléctricos de acuerdo con las formas de realización de la presente reduce las emisiones de CO₂ de las unidades CATOFIN® y permite reducir el uso de combustibles fósiles. Las formas de realización expuestas en la presente también superan el principal obstáculo para electrificar los procesos a escala comercial, notablemente la falta de un diseño demostrado para las condiciones requeridas para un calentador CATOFIN® que alcance hasta 800 °C a escala de 30-300 MW. Por ejemplo, los calentadores eléctricos de la presente pueden estar calificados para transferir calor en el rango de 30 a 300 MW, por ejemplo, tal como de un límite inferior de 30, 50, 75, 100 o 150 MW a un límite mayor de 150, 200, 225, 250, 275 o 300 MW, donde cualquier límite inferior puede ir estar emparejado con cualquier límite superior matemáticamente compatible.

[0037]Los calentadores de acuerdo con diversas formas de realización de la presente pueden disponerse como una sola caja del calentador que contenga los elementos de calentamiento dispuestos y configurados para proporcionar el calor necesario a la corriente de aire que se está al calentar. Debido al diseño compacto y eficaz descrito en la presente e ilustrado en las figuras, los calentadores eléctricos de acuerdo con las formas de realización de la presente pueden tener un área relativamente baja adecuada para la integración en plantas a escala

comercial, especialmente en comparación con las unidades de múltiples calentadores requeridas por los calentadores actualmente disponibles (<5 MW).

[0038] Con referencia ahora a la Figura 2, la Figura 2 ilustra un diseño para la sección de convección del calentador eléctrico de aire 100, que ilustra un ejemplo de un diseño de conducto de acuerdo con una o más formas de realización de la presente. El aire frío 104 fluye hacia la parte inferior del calentador eléctrico de aire 100, a través del conducto del calentador 105, y lo calienta los elementos de calentamiento 102 para producir un aire caliente 106. El diseño del conducto tiene un patrón de flujo y un ajuste del paso de los elementos para optimizar el coeficiente de transferencia de calor y la caída de presión. El revestimiento del elemento 102 de una cubierta vacía puede cambiarse a una cubierta con una superficie extendida, tal como un tubo de aleta baja con orificio liso. El diseño del elemento puede ser un alambre de resistencia de NiCr incorporado en MgO para el aislamiento eléctrico y encerrado en un tubo de aletas bajas. El voltaje de funcionamiento de la sección de convección del calentador eléctrico de aire 100 puede variar en el rango de 300 V a 7000 V, en función de la temperatura de funcionamiento requerida. El voltaje necesario se suministra a través de un terminal 108. Diversas formas de realización de calentadores eléctricos de la presente pueden tener un voltaje de funcionamiento en un rango de un límite inferior de 300, 500, 700, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500, 2750 3000, 3500, 4000, 4500, o 5000 V a un límite mayor de 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500, o 7000 V, donde cualquier límite inferior puede emparejarse con cualquier límite superior matemáticamente compatible.

[0039] Este diseño puede permitir un aumento del área/volumen de transferencia de calor disponible de alrededor de 200 % en comparación con los calentadores eléctricos a pequeña escala disponibles en la actualidad. El diseño también puede permitir reducir la longitud necesaria del elemento alrededor de 40 %, lo que reduce el tamaño del calentador, la caída de presión y el espacio necesario en comparación con los calentadores disponibles actualmente (<5 MW). El diseño de aleta baja puede ser capaz de funcionar a las altas temperaturas requeridas para el calentador de aire CATOFIN®. Estas aletas pueden ser similares a los tubos con aletas HPT disponibles a través de NEOTISS.

[0040] Con referencia ahora a las Figuras 3A-3G, se ilustran varias consideraciones de diseño para la estructura de transferencia de calor. Se trata de varios diseños de aletas, tal como tubo y placa (A y B), aleta circular (C) y aleta y placa (D), que combinados y acoplados a los elementos de calentamiento pueden optimizar el área de transferencia de calor por longitud de los elementos de calentamiento, como se describe en la presente. Como se observa en (E), (F), y (G), las conexiones eléctricas 200 se utilizan para aplicar corriente para calentar los tubos con el fin de proporcionar calentamiento eléctrico.

[0041] Con referencia ahora a la Figura 4, la Figura 4 ilustra un resumen de una sección radiante 400 de un calentador eléctrico de aire. Este diseño de calentador puede hacer funcionar los elementos eléctricos 402 a temperaturas más altas, donde el calor radiante es la transferencia de calor predominante. Los elementos 402 pueden estar descubiertos, es decir, pueden ser alambres resistivos sin la

cubierta metálica mostrada en la Figura 2, en relación con la sección de convección. En tales formas de realización, se introduce aire frío 404 en la parte inferior de la sección radiante 400 del calentador eléctrico de aire a través de uno o más tubos cerámicos 406, que los calientan los elementos eléctricos 402. El aire calentado 408 sale por la parte mayor de la sección radiante 400 del calentador eléctrico de aire a temperatura suficiente para regenerar el catalizador del reactor CATOFIN.

[0042] Luego, se muestra una lista no exhaustiva de los alambres resistivos adecuados y las temperaturas máximas de funcionamiento asociadas para la sección radiante del calentador de aire eléctrico:

[0043] aleaciones de NiCr que operan hasta 1100 °C.

[0044] aleaciones de FeCrAl que operan hasta 1300 °C.

[0045] MoSi₂ que funciona hasta 1850 °C.

[0046] SiC que funciona hasta 1600 °C.

[0047] Dado que el aire es un fluido transparente, el diseño de la sección radiante 400 del calentador eléctrico de aire puede incorporar un disipador de calor para adsorber el calor radiante. El material refractario cerámico 410 puede adsorber el calor radiante y transferir el calor al aire por convección. Se puede incorporar un área de transferencia de calor adicional al colocar un tubo cerámico en la línea central del conducto. Los elementos eléctricos 402 pueden montarse o incorporarse en el material refractario 410. El voltaje de funcionamiento de la sección radiante 400 del calentador eléctrico de aire puede variar en un rango de 300 V a 7000 V, en función de la temperatura de funcionamiento requerida. Las ventajas de este diseño son que permite calentar el aire a temperaturas superiores a las que se alcanzan en la sección 100 de convección del calentador de aire eléctrico.

[0048] En función de los requisitos del calentador (temperatura, capacidad) y de los elementos de diseño (material del elemento de calentamiento), los calentadores de acuerdo con las formas de realización de la presente pueden incluir una sección convectiva de calentamiento eléctrico (Figura 2), una sección radiante de calentamiento eléctrico (Figura 4), o ambas.

[0049] Dado que en la actualidad no están disponibles en el comercio de grandes calentadores eléctricos de aire de >10 MW, las mejoras mencionadas de los calentadores eléctricos de aire permiten calentar eficaz y eléctricamente el aire de regeneración necesario para el proceso de CATOFIN®.

[0050] Existen varias opciones para suministrar calor eléctrico a un proceso y pueden considerarse de acuerdo con la presente divulgación. Por ejemplo, procesos más exigentes con flujo bifásico y/o servicio de coquización.

[0051] Con referencia ahora a la Figura 5, la Figura 5 ilustra una visión general del Proceso CATOFIN®, donde componentes similares están representados por números de referencia similares con respecto a la Figura 1.

[0052] El reactor 10 CATOFIN® requiere aire caliente de regeneración 12 a alrededor de 500-800 °C para quemar el coque del catalizador y calentar el lecho catalítico, que impulsa la reacción de deshidrogenación. El proceso consiste en un compresor o compresores de aire 14, un calentador de aire de regeneración

eléctrica 500, los reactores 10 CATOFIN®, un intercambiador de recuperación de calor residual 18 y una chimenea 20. Se comprime una corriente de aire 22 a alrededor de 2,0-3,0 bares para transportarla a través del sistema de regeneración. Luego, el aire comprimido 24 se precalienta en el intercambiador de recuperación de calor residual 18 a alrededor de 300-500 °C. El aire precalentado 26 vuelve a pasar por el intercambiador de recuperación de calor residual 18 y, luego, se calienta en el calentador de aire de regeneración eléctrica 500 hasta 500-800 °C, con una absorción de calor que varía entre 30-300 MW, en función del índice de producción de la planta y de las condiciones de funcionamiento. Luego, el calentador de aire de regeneración eléctrica 500 alimenta los reactores 10 CATOFIN®, donde se quema el coque y se calienta el catalizador para recuperar el calor perdido debido a la reacción endotérmica de deshidrogenación. Luego, el aire calentado 30 fluye desde los reactores 10 CATOFIN® hasta el intercambiador de recuperación de calor residual 18, donde el aire se enfría a alrededor de 80-120 °C, lo que produce una corriente de aire frío 32. Luego, la corriente de aire frío 32 sale por la chimenea 20. El intercambiador de recuperación de calor residual 18 recupera energía del efluente de aire del reactor CATOFIN® 30, al precalentar el aire comprimido 24, lo que genera vapor a alta presión 34, y vapor a alta presión sobrecalentado 36. Un tambor de extracción 38 alimenta agua 40 al intercambiador de recuperación de calor residual 18 para producir vapor de fase mixta a través de un diseño de termosifón, que vuelve al tambor de extracción 38. Luego, el vapor de alta presión generado en 38 se mezcla con otras fuentes de vapor de alta presión 44 y se envía al intercambiador de recuperación de calor residual 18, donde se sobrecalienta, y luego se alimenta al desrecalentador 42, y luego se alimenta al intercambiador de recuperación de calor residual, donde produce vapor sobrecalentado 36.

[0053] El calentador eléctrico propuesto puede construirse en unidades múltiples por motivos de redundancia, o utilizarse en paralelo o en serie con un calentador de combustión convencional. Por ejemplo, la Figura 6 ilustra que el calentador de aire 100 % eléctrico 500 se sustituye por el calentador eléctrico 600 y el calentador de combustión 16 en serie. Los dos calentadores pueden estar en cualquier orden. La Figura 7 ilustra la sustitución del calentador de aire 100 % eléctrico 500 por el calentador eléctrico 700 y el calentador de combustión 16 en paralelo. En cualquiera de estas formas de realización, se pueden instalar múltiples calentadores eléctricos o calentadores de combustión para aumentar la capacidad, la redundancia, o ambas.

[0054] Para el calentador eléctrico para su uso en el sistema de aire de regeneración CATOFIN®, se puede utilizar una combinación de secciones de convección del calentador eléctrico de aire, secciones radiantes del calentador eléctrico de aire o ambas.

[0055] En una o más formas de realización, el combustible H₂ purificado, un subproducto de la unidad CATOFIN®, puede alimentar un calentador de aire regenerado por combustión para reducir aún más las emisiones de CO₂ en comparación con el uso de combustible de hidrocarburos.

[0056] En una o más formas de realización, el sistema puede generar vapor y

recalentarlo en el intercambiador de recuperación de calor residual. Sin embargo, en otras formas de realización, el ciclo de vapor puede eliminarse para minimizar el trabajo requerido de los calentadores de aire de regeneración.

[0057] Los elementos de calentamiento pueden tener diferentes apariencias y formas, como alambres redondos, alambres planos, alambres retorcidos, tiras, varillas, varillas sobredobladas, etc. Las personas del oficio de nivel medio entenderán con facilidad que la forma y el aspecto de los elementos de calentamiento no están especialmente limitados y estarán familiarizadas con la selección de las dimensiones adecuadas.

[0058] En cuanto al uso de tubos con aletas bajas y otras estructuras con aletas en combinación con elementos de calentamiento, las ventajas y los requisitos no eran evidentes porque la escala de la industria del calentamiento eléctrica no justificaba tales diseños. La conversión de grandes calentadores de combustión industriales de >10 MW en calentadores eléctricos exige un diseño más eficiente que el aceptado hasta ahora. Además, la optimización del diseño térmico de los calentadores eléctricos al modificar el ajuste del patrón de flujo y el paso de los elementos no era obvia porque los proveedores de elementos no tienen una amplia exposición a las tecnologías de transferencia de calor. Estas afirmaciones se desprenden de las soluciones propuestas en el estado de la técnica.

[0059] El uso de un calentador de aire eléctrico para el calentamiento del aire de regeneración CATOFIN® no era obvio porque no está disponible en el comercio a la escala de 30-300 MW requerida. Además, el objetivo principal del aire caliente es calentar el reactor CATOFIN® para catalizar la reacción endotérmica de deshidrogenación. Es complejo calentar el catalizador de forma directa y eléctrica con eficacia, lo que se supera al calentar el aire eléctricamente y alternar la alimentación de hidrocarburos y el flujo de aire caliente sobre el lecho del catalizador.

[0060] A menos que se indique lo contrario, todos los términos técnicos y científicos utilizados tienen el mismo significado que le otorgan comúnmente las personas del oficio de nivel medio a las que pertenecen estos sistemas, aparatos, métodos, procesos y composiciones.

[0061] Las formas singulares "un", "una", "el" y "la" incluyen referentes en plural a menos que el contexto dicte claramente lo contrario.

[0062] Como se usa en la presente y en las reivindicaciones que acompañan, los términos "comprende", "contiene", "incluye" y todas las variaciones gramaticales de estos pretenden tener un significado abierto, no limitativo, que no excluye elementos o etapas adicionales.

[0063] "Opcionalmente" significa que el suceso o las circunstancias descritas a continuación pueden producirse o no. La descripción incluye los casos en los que se produce el suceso o circunstancia y los casos en los que no se produce.

[0064] Cuando se utilizan las palabras "aproximadamente" o "alrededor de", este término puede significar que puede haber una variación en el valor de hasta $\pm 10\%$, de hasta 5% , de hasta 2% , de hasta 1% , de hasta $0,5\%$, de hasta $0,1\%$ o de hasta $0,01\%$.

[0065] Los rangos pueden expresarse como de alrededor de un valor particular a

alrededor de otro valor particular, inclusive. Cuando se expresa un rango de este tipo, debe entenderse que otra forma de realización es desde un valor particular hasta otro valor particular, junto con todos los valores particulares y combinaciones de estos dentro del rango.

[0066] Si bien la divulgación incluye un número limitado de formas de realización, las personas del oficio de nivel medio, que se benefician de esta divulgación, apreciarán que pueden idearse otras formas de realización que no se aparten del alcance de la presente divulgación. En consecuencia, el alcance debería estar limitado únicamente por las reivindicaciones adjuntas.