

APARATO DE CARCASA Y TUBOS DE BURBUJAS

Campo de la invención

La invención se relaciona a equipos de producción para procesos de gas-líquido y se puede utilizar en las industrias químicas, petroquímicas y otras.

5 Antecedentes del arte previo

Para la mayoría de los procesos de gas-líquido, uno o más de los reactivos de partida están en la fase gaseosa, y para que una reacción tenga lugar, los reactivos deben convertirse en la fase líquida o en el límite de las dos fases, lo que requiere unas altas tasas de transferencia de masa. Además, los procesos que se llevan a cabo en fase líquida y
10 gaseosa suelen ir acompañados de una alta liberación o absorción de calor, lo que requiere un intercambio de calor efectivo entre la mezcla y el agente de transferencia de calor.

También es de gran importancia la uniformidad de las condiciones para ejecutar la transferencia de calor y masa en todo el aparato, ya que el aumento o la reducción local en la temperatura de la mezcla de reacción o la concentración de reactivos pueden disminuir
15 la selectividad y conversión del proceso y la velocidad de reacción. La uniformidad de las condiciones de reacción se puede lograr al utilizar equipos con distribución uniforme de tubos por volumen, es decir, con distribución de tubos, que iguale las velocidades del flujo de la fase líquida en todo el aparato y elimine las zonas estancadas.

En el documento US 5.846.498 (publ. 08.12.1998) se divulga un aparato de carcasa
20 y tubos convencional para llevar a cabo procesos de gas-líquido exotérmicos (reacciones). El aparato comprende un tubo de aspiración hueco dispuesto en el mismo. El tubo aloja un medio impulsor para provocar la recirculación de líquido hacia abajo a través del tubo dentro de una cámara de mezcla inferior. El flujo de líquido se introduce en el aparato a través de una línea de alimentación y el gas se introduce por encima del nivel del líquido a
25 través de la línea. El aparato exhibe transferencia de calor mejorada, alta productividad y selectividad debido al uso de circulación forzada creada por los medios impulsores. Sin embargo, la fijación de la estructura de rotación rápida con un solo punto de anclaje (solo en posición ascendente) es técnicamente problemática, ya que mientras gira el impulsor puede desalinearse del eje de rotación bajo fuerzas tangenciales. Por lo tanto, se requerirán
30 sellos especiales para el funcionamiento del eje del impulsor a altas presiones. Además, se requiere una alta velocidad de líquido para crear el flujo descendente de gas-líquido a través del tubo central, lo que provocará pérdidas de energía adicionales en la rotación del impulsor. La longitud del aparato estará severamente limitada incluso con una velocidad de rotación significativa del impulsor.

35 El documento RU2040940 (publ. 09.08.1995) divulga un aparato para llevar a cabo procesos químicos de gas-líquido y de transferencia de calor y masa con un alto efecto

térmico, que puede reducir la dispersión del tiempo de permanencia (es decir, la desviación del tiempo de permanencia de los flujos reales de un valor nominal) de un reactivo líquido en el aparato a través de la provisión de su paso múltiple a través del área de trabajo. El aparato comprende un haz de tubos de burbujas (a través de los cuales fluye la mezcla de gas-líquido de abajo hacia arriba) y tubos de circulación (a través de los cuales el líquido regresa (circula) a la parte inferior del aparato), en donde los tubos se aseguran en placas de tubos y se alojan en una carcasa cilíndrica vertical; una cámara superior con placas verticales y una cámara inferior con dispositivo de distribución de gas. La carcasa comprende boquillas de alimentación y extracción de agente de transferencia de calor, la cámara inferior tiene una boquilla de alimentación de gas y una boquilla de drenaje. El aparato se caracteriza por la provisión de una separación vertical en la cámara inferior y un dispositivo de distribución de gas en forma de una separación horizontal con orificios a lo largo de los ejes de los tubos de burbujas. Además, las particiones están desplazadas con respecto a las placas en la cámara superior para crear un canal de paso múltiple para el flujo de líquido desde la boquilla de alimentación a la de extracción. Los elementos anteriores reducen la dispersión del tiempo de permanencia de porciones individuales de líquido. Al variar el número y la disposición de las placas en la cámara superior y las separaciones en la cámara inferior, es posible crear aparatos con un número deseado de pasos a través del espacio del tubo, que puede variar de 2 a 6-10. Sin embargo, tal aparato requiere una velocidad de flujo de gas alta para evitar la entrada de una gran cantidad de líquido en la cámara de gas inferior. Pero incluso funcionando con una velocidad de flujo de gas alta, la entrada de líquido en la cámara inferior no se puede evitar por completo, lo que puede provocar la pérdida de reactivos. Por tanto, el aparato que se divulga en RU2040940 incluye zonas inactivas ocupadas por gas. Además, debido al posible bloqueo de los orificios, no es deseable utilizar este aparato en procesos que puedan ir acompañados de precipitación de precipitados sólidos, compuestos de alto peso molecular y/o alta viscosidad, incluidos resinas y polímeros, y en procesos acompañados de cristalización de uno de los componentes de la mezcla de reacción.

En los aparatos convencionales que se describen a continuación, la distribución uniforme de gas sobre la sección transversal del aparato (es decir, la concentración de gas es la misma en cualquier punto del tubo en la sección horizontal del aparato) se logra debido al hecho de que las paredes de los tubos dispuestos debajo de la placa de tubos inferior tienen orificios para la transición de gas que ingresa a los tubos desde la capa de gas formada debajo de la placa de tubos. Sin embargo, el uso de aparatos con orificios en las paredes de los tubos es un problema en los procesos acompañados de la formación de catalizadores o productos de reacción cristalizados y precipitados debido al bloqueo de los

orificios y la alteración de los parámetros hidrodinámicos del aparato. La probabilidad de formación de mezclas de gases explosivos y vapores líquidos en el espacio de gas debajo de la placa de tubos inferior también limita la aplicabilidad de los aparatos.

Un aparato de elevación de gas que se divulga en el documento SU1212550 (publ. 23.02.1986) comprende una carcasa cilíndrica vertical que aloja placas de tubos superior e inferior para asegurar un haz vertical de tubos de circulación y burbujas. Los extremos superiores de los tubos de burbujas se encuentran dispuestos a una mayor altura que los extremos de los tubos de circulación. Con el fin de mejorar la productividad al aumentar la zona de reacción del aparato, la superficie de contacto de fase y crear una circulación estable, el aparato comprende además una placa de tubos suplementaria montada encima de la placa de tubos superior de modo que se forma una cámara de gas entre ellas. Los extremos de los tubos de burbujas están dispuestos en la fase gaseosa, mientras que los extremos de los tubos de circulación están dispuestos en la fase líquida y se proporcionan orificios en secciones del tubo de circulación dispuestas en la cámara de gas. El aparato comprende una cámara de separación con eliminador de gotas y boquillas de alimentación y extracción de fases y agentes de transferencia de calor. La estructura del aparato que se divulga no excluye la entrada de líquido de los tubos de circulación a la cámara de gas superior, lo que puede perjudicar su funcionamiento. Además, el flujo de gas, procedente de la cámara de gas superior, en los tubos de circulación puede verse obstaculizado al pasar a la parte inferior del aparato bajo el efecto de la fase líquida.

Un aparato que se divulga en el documento SU129643 (publ. 01.01.1960) está diseñado como una carcasa vertical con un tubo de circulación central. Cada tubo del aparato tiene un extremo alargado que se extiende a través de una placa de tubos inferior con orificios. La sección inferior del tubo de circulación está debajo de los cortes del tubo. Cuando se alimenta gas a través de un tubo ramificado al aparato, el líquido que llena la cavidad debajo de la placa de tubos se presiona hacia abajo y se forma una capa de gas debajo de la placa de tubos; burbujas de gas a través de los orificios de todos los tubos y, por lo tanto, se distribuye uniformemente sobre la sección del aparato. Mientras se elevan a través de los tubos, las burbujas de gas arrastran líquido y crean su circulación intensiva, lo que mejora la transferencia de calor. Sin embargo, el documento no describe que el aparato proporcione un intercambio de calor estable (es decir, gradiente de temperatura sin cambios en el aparato en el tiempo) en todo el aparato. Dado que el flujo de gas-líquido en los tubos de burbujas de este aparato, que están directamente adyacentes al tubo de circulación central, tendrá una velocidad mayor que en los otros tubos, se observarán diferentes condiciones de transferencia de calor y masa en diferentes partes del aparato, y como resultado, selectividad de reacción reducida. Los procesos que ocurren en el aparato

no serán estables incluso con un mayor número de tubos de circulación, ya que tanto los tubos de circulación como los de burbujas se extienden más allá de la placa de tubos, provocando así la acumulación de fase gaseosa en la parte inferior del aparato.

Otro aparato de elevación de gas de carcasa y tubos convencional, que se divulga en el documento SU199087 (publ. 01.01.1967), comprende: una cámara superior y una cámara inferior con camisas, placas de tubos y tubos de circulación que las atraviesan, y tubos de burbujas, cuyos extremos en la cámara superior se disponen a diferentes niveles, una boquilla de alimentación de fase líquida y una boquilla de alimentación de fase gaseosa. Durante la alimentación de gas, se forma una capa de gas debajo de la placa de tubos, desde la cual el gas entra en los tubos de burbujas a través de orificios. Debido a la diferencia de densidades de la fase líquida en los tubos de circulación y la mezcla de gas-líquido en los tubos de burbujas, se produce una circulación de fase intensiva: la mezcla de gas-líquido asciende a través de los tubos de burbuja y la fase líquida desciende a través de los tubos de circulación. Debido a la disposición de los extremos de los tubos a diferentes niveles, en la cámara superior la fase líquida se estratifica en función de la gravedad específica de los componentes. Sin embargo, el documento SU199087 no dice nada sobre la estabilidad de la circulación del flujo. El efecto de la cantidad de extensiones de tubo por encima de la placa de tubos superior del aparato en relación con la circulación de líquido no está respaldado por ejemplos específicos en la descripción de esta patente. Además, en este espacio se pueden formar mezclas de gases explosivos.

Por tanto, en la actualidad no se conoce en el arte ningún aparato que permita realizar procesos de gas-líquido acompañados de altos efectos térmicos, formación de precipitados cristalinos, compuestos de alto peso molecular y/o alta viscosidad, o acompañados de formación de gases explosivos, con alta eficiencia, en particular, con alta selectividad y altos rendimientos del producto deseado, donde el proceso es una reacción química.

RESUMEN DE LA INVENCION

El objeto de la presente invención es proporcionar un aparato de elevación de gas de carcasa y tubos de burbujas para llevar a cabo procesos de gas-líquido, que exhibe una transferencia de calor y masa estable y uniforme en todo el aparato, además de un rendimiento constante.

Un efecto técnico de la invención es la provisión de un aparato de elevación de gas de carcasa y tubos de burbujas que reduce la dispersión del tiempo de permanencia del líquido en la zona de reacción, mejora la eficiencia hidrodinámica y aumenta también la selectividad de los procesos que se llevan a cabo en el aparato (incluidas reacciones químicas).

Otro efecto técnico de la invención es la provisión de un aparato de elevación de gas de carcasa y tubos de burbujas que permite procesos con efectos térmicos significativos, así como procesos acompañados de la formación de precipitados sólidos, compuestos de alto peso molecular y/o alta viscosidad, incluidos resinas y polímeros, y también procesos
5 acompañados de cristalización de uno de los componentes de la mezcla de reacción.

Otro efecto técnico de la invención es la probabilidad reducida de formación de mezclas explosivas de vapores gaseoso y líquidos debido al volumen reducido del espacio de gas en el aparato, que no reacciona con la fase líquida.

Además, el presente aparato está libre de zonas inactivas ocupadas por gas.

10 Además, la productividad del aparato se mejora debido al aumento de la eficiencia volumétrica del aparato y al aumento de la zona de reacción.

En el contexto de la presente invención, la estabilidad de la transferencia de calor y masa en el aparato se interpretará como la constancia de características (composición, temperatura, velocidad de flujo, etc.) en cada punto de flujo a lo largo del tiempo.

15 El funcionamiento estable del aparato se interpretará como el modo de funcionamiento, cuyas características vuelven al estado inicial después de que se ha eliminado una perturbación.

Además, la dispersión del tiempo de permanencia del líquido en la zona de reacción se interpretará como la desviación del tiempo de permanencia de los flujos reales de un valor nominal, y la eficiencia hidrodinámica se interpretará como características de
20 aproximación del aparato real a un aparato de flujo pistón.

En el contexto de la presente invención, el término “sustancialmente” significa una desviación dentro de un rango de error permisible para un valor particular determinado por un experto en la materia.

25 El objeto y los efectos técnicos se logran mediante el uso de un aparato, que comprende una o más unidades verticales de carcasa y tubos formadas como una carcasa con dispositivos de alimentación de reactivos y dispositivos de extracción de productos de reacción, dispositivos de alimentación y extracción de agentes de transferencia de calor; dos grupos de tubos asegurados mediante placas de tubos en la parte superior e inferior de
30 la carcasa, un grupo de tubos que se extiende más allá de la placa de tubos inferior, y el segundo grupo de tubos tiene extremos de tubo sustancialmente al ras con la placa de tubos inferior, en donde los tubos del primer grupo de tubos se distribuyen de manera sustancialmente uniforme sobre la placa de tubos.

Los inventores han descubierto inesperadamente que la estructura y disposición de
35 la invención del primer y segundo grupo de tubos mantiene una dirección de flujo constante en los tubos, lo que proporciona una transferencia de calor y masa estable y uniforme en

todo el aparato y un rendimiento constante del aparato, asegurando así los efectos técnicos reivindicados.

A continuación, se ofrece una descripción detallada de varios aspectos y realizaciones de la presente invención.

5 Los tubos del primer grupo de tubos se extienden de 10 a 150 mm, preferiblemente de 50 a 100 mm, más allá de una placa de tubos inferior. Si la longitud de extensión de los tubos del primer grupo de tubos con respecto a la placa de tubos inferior es inferior a 10 mm, aumenta la probabilidad de deslizamiento de gas a través del circuito de circulación, lo que altera la hidrodinámica y, como consecuencia, la transferencia de calor y masa en el
10 aparato. No se aconseja la extensión de los tubos del primer grupo de tubos en más de 150 mm con respecto a la placa de tubos inferior, ya que esto puede aumentar las dimensiones geométricas del aparato y, en consecuencia, su contenido metálico sin mejorar la eficiencia del aparato. Las partes extensibles de los tubos del primer grupo pueden tener la misma longitud o una diferente. La misma longitud de las partes que se extienden de los tubos del
15 primer grupo de tubos no es un requisito previo para el funcionamiento del aparato. La condición determinante es la longitud de más de 10 mm, suficiente para evitar que entre gas en ellos.

Los diámetros de los tubos del primer y segundo grupo de tubos pueden ser iguales o diferentes, sin embargo, para aumentar la zona de contacto de gas/líquido, es preferible
20 utilizar los tubos del segundo grupo de tubos de un diámetro mayor que los tubos del primer grupo de tubos.

El requisito obligatorio para el funcionamiento del aparato es la distribución uniforme de los tubos del primer grupo de tubos en todo el aparato, es decir, la distribución de los tubos, que iguala las velocidades de la fase líquida en todo el aparato y elimina las
25 zonas estancadas.

La proporción del número de tubos del primer y segundo grupo de tubos es de 1:1,25 a 1:5. Preferiblemente, al menos uno de los tubos del primer grupo de tubos es adyacente a cada uno de los tubos del segundo grupo de tubos en la sección horizontal de la unidad. Más preferiblemente, cada uno de los tubos del primer grupo de tubos está rodeado en
30 perímetro por los tubos del segundo grupo de tubos en la sección horizontal de la unidad. Esta disposición de los tubos se consigue en una proporción de aproximadamente 1:2.

En una realización, los tubos del primer grupo de tubos son los tubos de circulación y los tubos del segundo grupo de tubos son tubos de burbujas.

Las dimensiones generales del dispositivo, el número de unidades de carcasa y
35 tubos, el número de tubos en la unidad y el número total de tubos en el aparato se seleccionan en función de los requisitos de la aplicación específica del dispositivo.

Los dispositivos de alimentación de reactivos incluyen un dispositivo de alimentación de fase líquida y un dispositivo de alimentación de fase gaseosa, y los dispositivos de extracción del producto de reacción incluyen un dispositivo de extracción de fase líquida y un dispositivo de extracción de fase gaseosa.

5 El aparato se puede emplear como reactor para llevar a cabo diversas reacciones en fase líquida, por ejemplo, oxidación de hidrocarburos, oligomerización de olefinas, síntesis de ácidos carboxílicos, cloración de etileno, hidroformilación y como aparato para procesos microbiológicos, etc.

10 Un método para llevar a cabo reacciones químicas en un aparato de carcasa y tubos de burbujas de acuerdo con la invención comprende:

- alimentar una fase líquida para llenar todo el volumen libre en la parte del tubo del aparato;

- alimentar una fase gaseosa a la parte inferior del aparato para hacer que el gas suba a la placa de tubos inferior y entre en los tubos del segundo grupo de tubos de modo que los tubos del segundo grupo de tubos funcionen como tubos de burbujas;

- proporcionar movimiento de líquido bajo el efecto del gas hacia arriba a través de los tubos de burbujas;

- al llegar a la parte superior del aparato, se separa la mezcla de gas-líquido;

- retirar la fase gaseosa del aparato;

20 - retirar una porción más pequeña de la fase líquida, mientras que una porción más grande de la fase líquida comienza a moverse por gravedad hacia abajo a través de los tubos del primer grupo de tubos que actúan como tubos de circulación.

25 Otras características y ventajas de la presente invención serán más evidentes de acuerdo con las realizaciones preferidas de la presente invención, que se describen con más detalle con referencia a los dibujos adjuntos. Las realizaciones se proporcionan para describir la presente invención solo como un ejemplo y, por lo tanto, no deben interpretarse como limitantes del alcance técnico de la presente invención.

Breve descripción de los dibujos

30 La Figura 1 ilustra un aparato para llevar a cabo reacciones exotérmicas de gas-líquido según el documento US 5.846.498.

La Figura 2 ilustra un aparato para llevar a cabo procesos químicos de gas-líquido y de intercambio de calor y masa según el documento RU2040940.

La Figura 3 ilustra un aparato de elevación de gas según el documento SU1212550.

La Figura 4 ilustra un aparato según el documento SU129643.

35 La Figura 5 ilustra un aparato según el documento SU199087.

La Figura 6 ilustra esquemáticamente la estructura de un aparato según la presente

invención.

La Figura 7 ilustra esquemáticamente la disposición de los tubos en el aparato según el Ejemplo Comparativo 2.

La Figura 8 ilustra esquemáticamente la disposición de los tubos en el aparato según el Ejemplo Comparativo 3.

La Figura 9 ilustra esquemáticamente la disposición de los tubos en el aparato según el Ejemplo 4.

La Figura 10 ilustra esquemáticamente la disposición de los tubos en el aparato según el Ejemplo 5.

La Figura 11 ilustra una unidad del aparato según la invención.

La Figura 12 ilustra un aparato de vidrio con tubos de la misma longitud según el Ejemplo Comparativo 6.

Realizaciones de la invención

Un aparato de acuerdo con la invención, que se muestra esquemáticamente en la Figura 6, comprende una única unidad vertical de carcasa y tubos 1 con tubos de circulación 3 y tubos de burbujas 4 asegurados en una placa de tubos 2. La parte inferior del aparato comprende un dispositivo de alimentación de líquido 5 y un dispositivo de alimentación de gas 6. La parte superior del aparato comprende un dispositivo de extracción de fase gaseosa 7 y un dispositivo de extracción de fase líquida 8. El espacio intertubular del aparato comprende boquillas de circulación 9 y 10 del agente de transferencia de calor. Dispositivo de alimentación y extracción se refiere en lo sucesivo a cualquier medio convencional de alimentación y extracción de flujo, por ejemplo, una boquilla, un inyector, etc.

El proceso se lleva a cabo en el aparato inventivo de la siguiente manera:

1. La fase líquida se alimenta a través del dispositivo de alimentación de líquido 5 para llenar completamente todo el volumen libre en la parte del tubo del aparato;

2. La fase gaseosa se alimenta entonces a través del dispositivo de alimentación de gas 6 a la parte inferior del aparato;

3. El gas sube por la placa de tubos 2 y luego entra en los tubos de burbujas 4;

4. El líquido comienza a moverse hacia arriba a través de los tubos de burbujas bajo el efecto del gas;

5. Una vez se alcanza la parte superior del aparato, se separa la mezcla de gas-líquido;

6. La fase gaseosa se extrae del aparato a través del dispositivo de extracción de gas 7;

7. Una porción más pequeña de la fase líquida se extrae a través del dispositivo de extracción de líquido 8, y una porción más grande de la fase líquida comienza a moverse

hacia abajo por gravedad a través de los tubos de circulación 3.

La distribución uniforme de los tubos de circulación asegura la misma velocidad de líquido a través de todos los tubos de burbujas y, como consecuencia, las mismas condiciones para los procesos de transferencia de calor y masa que se ejecutan en todo el aparato. Para asegurar la transferencia de calor en el espacio intertubular del aparato, se hace circular un agente de transferencia de calor a través de las boquillas 9 y 10.

Ejemplos

Ejemplo Comparativo 1. Uso de un aparato que comprende tubos de la misma longitud.

10 Las pruebas se llevaron a cabo en un aparato de acero que comprende una unidad vertical de carcasa y tubos de 80 mm de diámetro que tiene 19 tubos de 725 mm de largo y 13x1,4 mm de diámetro, asegurados en una placa de tubos. La parte inferior del aparato comprende una boquilla de alimentación de líquido y gas. La parte superior del aparato comprende boquillas de extracción de fase líquida y gaseosa. El espacio intertubular del
15 aparato comprende boquillas de circulación del agente de transferencia de calor (ver Fig. 2).

Las pruebas se llevaron a cabo a presión atmosférica. Se utilizó ciclohexano como fase líquida y nitrógeno como fase gaseosa. El número de tubos en el modo de burbujeo se determinó de manera visual cada minuto mediante las burbujas emergentes de gas. Luego,
20 los resultados se promediaron durante el intervalo de tiempo de 30 minutos y se llegó a una conclusión sobre el modo y la actividad de cada tubo.

Sin extensión de tubos, se observó una alternancia caótica de tubos de circulación y burbujas. Además, en funcionamiento, el tubo de circulación podría burbujear y viceversa. Además, el número de tubos de burbujas fue diferente en diferentes momentos. Todo esto
25 indica la inestabilidad del régimen de flujo de la mezcla de gas-líquido a lo largo del tiempo. Esto conlleva a saltos locales en la concentración de gas disuelto y temperatura, que también se observaron visualmente. Cabe señalar que este aparato comprende aproximadamente un 60 % de tubos, a través de los cuales no pasa gas, lo que significa que no se produce ningún movimiento de líquido en la parte de tubos ni se forman zonas
30 estancadas.

Ejemplo Comparativo 2. Uso de un aparato que comprende un solo tubo extendido.

Las pruebas se llevaron a cabo en el aparato que se describe en el Ejemplo 1, con la diferencia de que el tubo dispuesto en el centro del aparato se extiende 50 mm por debajo de la placa de tubos (ver Fig. 7).

35 La extensión de un tubo central define estrictamente que este tubo es el tubo de circulación. Sin embargo, la capacidad de rendimiento del tubo no es suficiente para

proporcionar una circulación estable de líquido a través de la unidad del aparato. Además, parte de los tubos de burbujas entran en el régimen de circulación caótica de líquido, es decir, funcionan alternativamente como tubos circulantes o de burbujas, lo que conlleva, como en el Ejemplo 1, a saltos locales en la concentración de gas disuelto y temperatura.

5 Ejemplo Comparativo 3. Uso de un aparato que comprende tres tubos extendidos.

Las pruebas se llevaron a cabo en el aparato que se describe en el Ejemplo 1, con la diferencia de que tres tubos, dispuestos uno al lado del otro alrededor de un tubo central, se extienden 50 mm hacia abajo más allá de la placa de tubos (ver Fig. 8).

10 El aumento del número de tubos de circulación a tres y su distribución sobre el aparato estabilizó significativamente el flujo. Todos los tubos de burbujas funcionaron solo como tubos de burbujas. Sin embargo, la tasa de producción de gas, y por tanto de líquido, en los tubos de burbujas fue significativamente diferente, lo que condujo a la desestabilización de condiciones de transferencia de calor y masa en el espacio del tubo del aparato.

15 Ejemplo 4. Uso de un aparato que comprende tres tubos de circulación dispuestos cerca de un tubo central, con tres tubos de la fila exterior tapados.

20 Las pruebas se llevaron a cabo en el aparato que se describe en el Ejemplo 1, con la diferencia de que tres tubos, dispuestos uno al lado del otro alrededor del tubo central, se extienden 50 mm más allá de la placa de tubos, y se tapan tres tubos de la fila exterior (ver Fig.9).

25 Esta distribución de tubos de circulación asegura un rendimiento constante de la unidad con una velocidad media de circulación de líquido en todo el aparato (es decir, la velocidad media de circulación de líquido es sustancialmente constante a lo largo del tiempo en todo el aparato). Esto da como resultado condiciones uniformes de transferencia de calor y masa en todo el aparato.

 Ejemplo 5. Uso de un aparato que comprende tres tubos de circulación dispuestos cerca de un tubo central y tres tubos de circulación de la fila exterior.

30 Las pruebas se llevaron a cabo en el aparato que se describe en el Ejemplo 1, con la diferencia de que tres tubos, dispuestos uno al lado del otro alrededor del tubo central, se extienden 50 mm más allá de una placa de tubos (ver Fig. 9).

35 El aumento del número de tubos de circulación a seis conlleva a un aumento significativo en la velocidad de circulación del líquido. Además, la estructura del flujo es constante, es decir, la composición, las velocidades locales y las características físicas del medio en cada punto del flujo en la zona de trabajo del aparato permanecen sustancialmente constantes en el tiempo. Esto da como resultado condiciones de transferencia de calor y masa uniformes en todo el aparato. En comparación con el Ejemplo

4, las velocidades de la fase líquida aumentan, aumentando así la eficacia de la eliminación de calor de la superficie del aparato.

Ejemplo Comparativo 6. Pruebas de transferencia de masa en un aparato de vidrio que comprende tubos de la misma longitud.

5 Las pruebas se llevaron a cabo en un aparato de vidrio de 2 litros de volumen, que comprende una unidad vertical que tiene dos placas de tubos metálicas de 100 mm de diámetro con 19 tubos de vidrio de 800 mm de longitud y 10x1,5 mm de diámetro, asegurados en las placas de tubos. Todos los tubos se extendían más allá de la placa de tubos. La parte inferior del aparato comprende boquillas de alimentación de líquido y gas.
10 La parte superior del aparato comprende boquillas de extracción de fase líquida y gaseosa (ver Fig. 2).

Las pruebas se llevaron a cabo a presión atmosférica. Se utilizó una solución acuosa de NaOH como fase líquida y dióxido de carbono como fase gaseosa. La velocidad del líquido se estableció mediante una bomba, la concentración de líquido en la salida se midió con un
15 medidor de pH. El gas se alimentó desde un cilindro a través de un medidor de flujo.

La reacción de neutralización avanza con una velocidad alta, respectivamente, el factor limitante del proceso es la transición del dióxido de carbono al líquido. Por medio del ejemplo de reacción de neutralización del ácido carbónico con un álcali fuerte, es posible estimar la efectividad de la transferencia de masa entre las fases gaseosa y líquida en el
20 aparato.

Las pruebas se llevaron a cabo de la siguiente manera: el aparato se llenó completamente de líquido a través de una bomba. Luego se estableció una velocidad de flujo constante requerido (200 ml/min) de fase líquida y se inició la inyección de gas (500 ml/min). Los valores de pH se detectaron cada 2 minutos. El establecimiento del
25 funcionamiento en estado constante se fijó en el momento en el que no se producía variación del valor de pH en la salida del aparato dentro de los 10 minutos.

Con los parámetros anteriores, el tiempo para el funcionamiento en estado constante fue de 40 minutos, con un valor de pH estacionario = 10,2. Además, se observó un movimiento caótico de flujo de dos fases como en el Ejemplo 1.

30 Ejemplo 7. Pruebas de transferencia de masa en un aparato de vidrio que comprende tres tubos de circulación dispuestos cerca de un tubo central y tres tubos de circulación de la fila exterior.

Las pruebas se llevaron a cabo en un aparato de vidrio de 2 litros de volumen, que comprende una unidad vertical que tiene dos placas de tubos metálicas de 100 mm de
35 diámetro y 19 tubos de vidrio de 800 mm de longitud y 10x1,5 mm de diámetro, asegurados en las placas de tubos. Parte de los tubos se extendía más allá de la placa de tubos inferior

como en el Ejemplo 5. La parte inferior del aparato comprendía una boquilla de alimentación de líquido y gas. La parte superior del aparato comprendía boquillas de extracción de fase líquida y gaseosa (ver Fig. 9).

Las pruebas se llevaron a cabo a presión atmosférica. Se utilizó una solución acuosa de NaOH como fase líquida y dióxido de carbono como fase gaseosa. La velocidad del líquido se ajustó mediante una bomba, la concentración de líquido en la salida se midió con un medidor de pH. El gas se alimentó desde un cilindro a través de un medidor de flujo.

Las pruebas se llevaron a cabo de la siguiente manera: el aparato se llenó completamente de líquido a través de una bomba. Se ajustó entonces la velocidad de flujo constante requerido (200 ml/min) de la fase líquida y se inició la inyección de gas (500 ml/min). Los valores de pH se detectaron cada 2 minutos. El establecimiento de la condición del estado constante se fijó en el momento en el que no se producía variación en el valor de pH en la salida del aparato dentro de los 10 minutos.

Con los parámetros anteriores, el tiempo para el funcionamiento en estado constante fue de 30 minutos, con un valor de pH estacionario = 9,4.

Como se puede observar en los Ejemplos 6 y 7, los procesos de transferencia de masa son más eficaces en el aparato de la invención dado que el valor de pH estacionario es menor. La disminución del pH indica que los procesos de intercambio de masa (reacciones) se desarrollan en el sistema de gas-líquido de manera más rápida y completa. Además, el tiempo para alcanzar el equilibrio se reduce en un 25 %, lo que indica que no existen zonas estancadas que puedan causar saltos notables en la concentración de la fase líquida, y que el aparato comprende un campo de velocidad uniforme, lo que permite una transferencia de masa efectiva en la fase líquida.

Ejemplo Comparativo 8. Uso de un aparato que comprende tubos de la misma longitud que un reactor para trimerización de etileno.

Las pruebas se llevaron a cabo en un reactor de acero que comprende una unidad vertical de carcasa y tubos de 80 mm de diámetro, que tiene 19 tubos de 725 mm de longitud y 13x1,4 mm de diámetro, asegurados en una placa de tubos. La parte inferior del reactor comprende una boquilla de alimentación de líquido y gas. La parte superior del reactor comprende boquillas de extracción de fase líquida y gaseosa. El espacio intertubular del reactor comprende boquillas de circulación del agente de transferencia de calor (ver Fig. 2).

La reacción de trimerización de etileno se llevó a cabo a una presión de 14 bar. Se usó ciclohexano con la adición de un complejo catalítico homogéneo como fase líquida y se usó etileno como fase gaseosa. La concentración del producto de reacción, hexeno-1, y los subproductos se midió mediante muestreo periódico en la salida del reactor. Se utilizó

cromatografía de gases como método de control analítico.

La concentración de hexeno-1 en la salida del reactor varió dentro del intervalo de 6-7 % en peso con una selectividad de 96-97 %.

Ejemplo 9. Uso de un aparato que comprende tres tubos de circulación dispuestos cerca de un tubo central y tres tubos de circulación de la fila exterior como reactor para trimerización de etileno.

Las pruebas se llevaron a cabo en el aparato que se describe en el Ejemplo 8, con la diferencia de que tres tubos, dispuestos uno al lado del otro alrededor del tubo central, se extendían 50 mm más allá de la placa de tubos (ver Ejemplo 5).

La concentración de hexeno-1 en la salida del reactor varió, como en el Ejemplo 8, dentro del intervalo de 6-7 % en peso con una selectividad de 96-97 %.

La diferencia entre las pruebas de los Ejemplos 8 y 9 es casi imperceptible debido a la capacidad relativamente pequeña del tubo del reactor, que fue aproximadamente el 60 % del volumen total de reacción en las pruebas.