

Investigación de la Circulación de Gránulos en Capas de Vórtice Suspendidos con Diferentes Configuraciones

Resumen: En este artículo se presentan los resultados de estudios experimentales del movimiento en el espacio de los gránulos en un granulador de vórtice. Se muestran los fenómenos de mezclado lateral, circulación por altura y por radio y clasificación por peso. Para una intensificación de los procesos de mezclado de partículas y de alineación de campos de temperatura de gránulos en granuladores de vórtice se propone el uso de lecho fluidizado combinado la cual se compone del movimiento que brota de los gránulos desde el centro del dispositivo y del torbellino de gránulos en la periferia del dispositivo. Se investigaron condiciones básicas de trabajo de lechos fluidizado de vórtice. Se encontró la dependencia de la componente de velocidad circunferencial en el radio y la altura del granulador para diversas configuraciones de lechos fluidizado de vórtice.

Palabras Claves: Granulador de Vórtice, Circulación, Mezclado, Clasificación.

Abstract: Results of experimental studies of regularities of granules movement in working space of the vortex granulator are presented in article. The phenomena of side mixing, circulation by height and by radius, classification by weight are shown. For an intensification of mixing processes of particles and alignment of temperature fields of granules in vortex granulators is offered use of the combined fluidized bed which combines the gushing forth movement of granules in the center of the device and whirl of granules on the periphery of the device. Basic modes of work of the vortex fluidized bed are investigated. Dependences of circumferential velocity component on the radius and height of the granulator for various configurations of the vortex fluidized bed are received.

Keywords: Vortex Granulator, Circulation, Mixing, Classification.

Artem E. Artyukhov⁽¹⁾, Volodymyr S. Vedmedera⁽¹⁾, Pablo C. Rossi⁽²⁾

⁽¹⁾Universidad Estatal de Sumy; 2, Rymskogo-Korsakova st.,40007; Sumy, Ucrania

⁽²⁾Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Ingeniería; Ruta Nac. 36 Km 601; Río Cuarto, Argentina

Mail: artyukhov@pohnp.sumdu.edu.ua

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Una cantidad significativa de ramas de la industria química se dedica a los procesos heterogéneos del sistema “gas-líquido-sólido” tomando un lugar especial entre otros procesos, después de todo, la velocidad se define por la relación de la transferencia de masa y calor entre las fases que interactúan. Entre estos procesos podemos encontrar los de granulación [1].

La base teórica para el modelado del proceso de granulación, la creación de métodos de ingeniería y la optimización de los cálculos del equipamiento de granulación provienen de las teorías de la hidrodinámica y de la transferencia de calor y masa considerando la interrelación e interdependencia entre las características hidrodinámicas y de transferencia de calor de las fases que están en contacto entre sí.

La aplicación del principio de lecho fluidizado permite aumentar la eficiencia energética del proceso de granulación. Las principales ventajas de dicho sistema hidrodinámico se indican en un gran número de trabajos [2-6]. A pesar de las numerosas ventajas, los dispositivos con un lecho fluidizado clásico se caracterizan por una serie de limitaciones entre las que se distinguen la aparición de dificultades al momento de mantener una fase dispersa y el lecho posee una estabilidad baja ante un amplio rango de cambios cargas de fases líquidas, sólidas y de gas. Estas limitaciones conducen a la caída de la intensidad de los procesos de transferencia de calor en una granulación.

El rápido desarrollo de la teoría y práctica de la aplicación de lecho fluidizado en equipos causó la creación e implementación de los nuevos diseños de granuladores. El estudio de patentes [7-31] y referencias [32-34] permitió definir los principales criterios de clasificación de los dispositivos que se han encontrado aplicación en la industria en las últimas dos décadas. La lista proporcionada por las fuentes no es exhaus-

tiva desde el punto de vista de la cobertura de todos los diseños existentes de granuladores de lecho fluidizado, pero es indicativa teniendo en cuenta los diseños más eficaces de granuladores. De este análisis se encontró que el uso de granuladores de lecho fluidizado se comercializan en escalas de baja o media potencia.

La revisión de los diseños de los granuladores de lecho en suspensión permitió obtener las siguientes tendencias en el desarrollo de la tecnología mundial de una granulación:

- Demanda de nuevos diseños de construcción: generalmente demandado por grandes empresas industriales que producen fertilizantes minerales y tienen autoridad en el mercado mundial. La representación de instituciones científicas tiene una competencia más pequeña en esta dirección;
- Los diseños de construcción son protegidos intelectualmente por las empresas industriales con patentes nacionales e internacionales;
- La esencia de la gran mayoría de los documentos se reduce a la mejora constructiva de los granuladores existentes, pero no al estudio de nuevas formas de movimiento de flujos.

Todas estas tendencias son testimonio de la reducción del componente científico en el desarrollo tecnológico de la granulación en capa pesada. Los dispositivos de lecho suspendido clásico tienen procedimientos de cálculo conocidos y no hay necesidad de una revisión de tales técnicas. Pero las nuevas formas de movimiento de flujos se exige una cuidadosa descripción teórica.

Entre los métodos de intensificación de procesos en transferencia de calor, uno de los más prometedores

es el método con la aplicación de intensificaciones por empuje (plug-in) que crean un flujo con vórtice en el espacio de trabajo del dispositivo.

El uso de flujo con vórtice como método de una intensificación de la transferencia de calor o de los procesos de transferencia de masa ganó aceptación en los procesos de combustión [35], absorción [36], rectificación [37], en turbinas [38], eyectores [39], reactores [40], separadores [41], etc., pero hasta el momento, la aplicación de este método no está muy extendido en procesos de granulación de lecho fluidizado.

En la actualidad, prácticamente no hay datos sobre el comportamiento del movimiento de partículas en el lecho suspendido (o fluidizado) de vórtice, la estructura del lecho suspendido de vórtice y las características hidrodinámicas las cuales forman la base de los cálculos de ingeniería para los equipos de granulación. La necesidad de llevar a cabo esta investigación tiene como propósito la creación de modelos matemáticos hidrodinámicos y de transferencia de calor y masa de la granulación con vórtice. La relevancia de este trabajo reside en la creación de métodos de cálculo y diseños nuevos altamente eficaces de granuladores de vórtice.

Objetivos

1. Estudio de los procesos de mezclado lateral y circulación vertical de gránulos en lecho suspendido de vórtice. Modos básicos del mezclado en lecho suspendido de vórtice.
2. Descripción teórica de los procesos de clasificación de gránulos en el espacio del granulador de vórtice y la validación experimental de este fenómeno.
3. Estudio de las características de la formación del lecho suspendido combinado y sus características hidrodinámicas.

4. Análisis de los resultados de la investigación y desarrollo de nuevos diseños de granuladores de vórtice combinado con lecho suspendido.

METODOLOGÍA

Siguiendo los objetivos, se realizaron estudios experimentales en los laboratorios de investigación del “Departamento de Procesos y Equipamientos de Química y Refinerías de Petróleo” en las instalaciones Universidad Estatal de Sumy, los dispositivos y el modo de funcionamiento son mostrados en las Figuras 1-3.

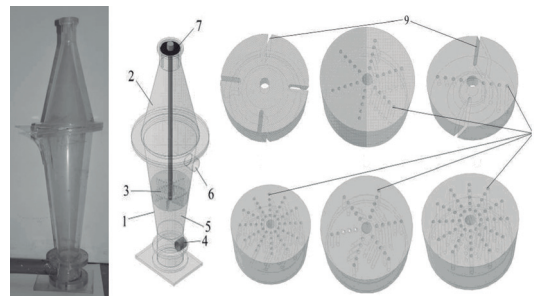


Figura 1. Soporte experimental para el estudio del proceso de circulación y clasificación de gránulos: a - vista general; b - diseño de dispositivos de distribución de gas; 1 - espacio de trabajo del granulador; 2 - zona de separación; 3 - dispositivo de distribución de gas; 4 - entrada de corriente de gas; 5 - zona de redistribución de la corriente de gas; 6 - salida de gránulos pequeños; 7 - salida de corriente de gas; 8 - perforaciones del dispositivo de distribución de gas (vertical o inclinada) 9 - hendiduras inclinadas de perforación del dispositivo de distribución de gas.

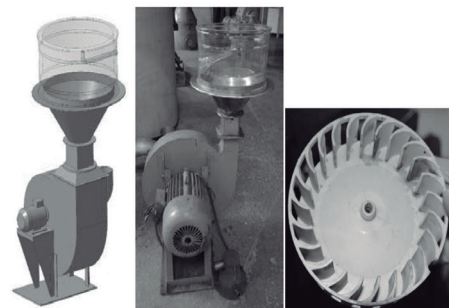


Figura 2. Soporte experimental para el estudio de las trayectorias de los movimientos de los gránulos en el lecho suspendido de vórtice: a - vista general; b - diseño del dispositivo de distribución de gas.

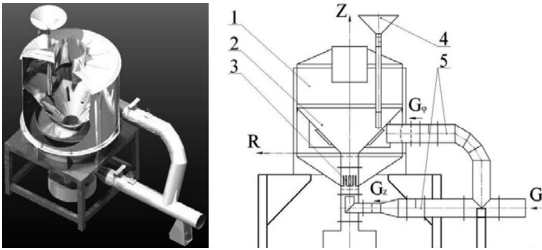


Figura 3. Soporte experimental del granulador de vórtice combinado con lecho suspendido: 1 - espacio de trabajo del dispositivo; 2 - capa interna; 3 - dispositivo de distribución de gas; 4 - entrada de retorno; 5 - conductos de tubería para la creación de corrientes de aire tangencial y ascendente; G - consumo de aire general; Gz - flujo de aire para crear el lecho de gránulos; Gφ - flujo de aire para crear el lecho de vórtice de gránulos; Z - altura del espacio de trabajo del granulador; R - radio del espacio de trabajo del granulador.

El esquema del estudio del movimiento de las trayectorias de los gránulos se presenta en la Figura 4, el esquema de sondeo del vórtice del granulador (determinación de la velocidad de movimiento de la corriente gaseosa) se muestra en la Figura 5.

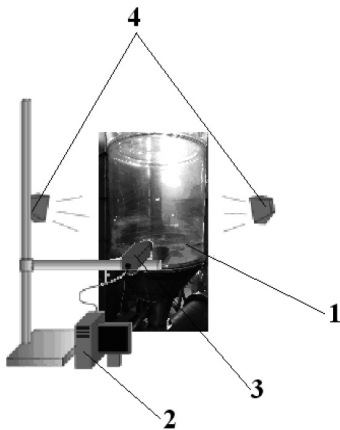


Figura 4. Esquema del estudio la velocidad y la trayectoria del movimiento de gránulos por medio de vídeo y fotografía: 1 - granulador; 2 - computadora personal; 3 - cámara de alta velocidad; 4 - iluminación.

El modelado matemático se llevó a cabo sobre la base de conceptos clásicos de la mecánica de líquidos y gases y técnicas hidromecánicas. La resolución de las

ecuaciones del modelado matemático se resolvió por medio del sistema matemático computacional Maple (www.maplesoft.com). El modelado del movimiento de corrientes se resolvió por medio del software COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release (www.solidworks.com), el cual se basa en el método de volumen finito para la resolución de las ecuaciones hidrodinámicas y el uso de un mallado rectangular adaptativo con suavizado local.

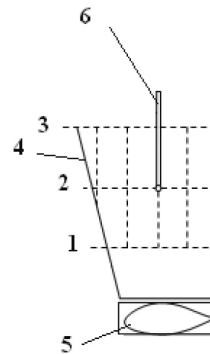


Figura 5. Esquema de sondeo del granulador de vórtice: 1, 2 - secciones intermedias; 3 - sección de salida; 4 - espacio del dispositivo de trabajo; 5 - impulsor; 6 - Termoanemómetro TES-1340.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mezclado Lateral y Circulación de Gránulos

El lecho suspendido existe dentro de las velocidades críticas del movimiento de la corriente de gas w_1 (el comienzo de fluidificación de material) y w_2 (que provocan el lecho suspendido del material) y se caracteriza por la diferencia de intensidad. En la práctica la condición de capa de material disperso en el modo de fluidización se caracteriza por un parámetro llamado número de fluidización [42]

$$K_w = \frac{w_p}{w_l} \quad (1)$$

donde w_p es la velocidad de trabajo del movimiento de la corriente de gas la cual proporciona la fluidización de la fase dispersa.

En la Figura 6 se muestran las condiciones básicas de los movimientos de gránulos mientras el granulador va variando el funcionamiento en un rango de números de fluidización. Cabe señalar que se investigó en el rango de operación del granulador de acuerdo con investigaciones previas [43].

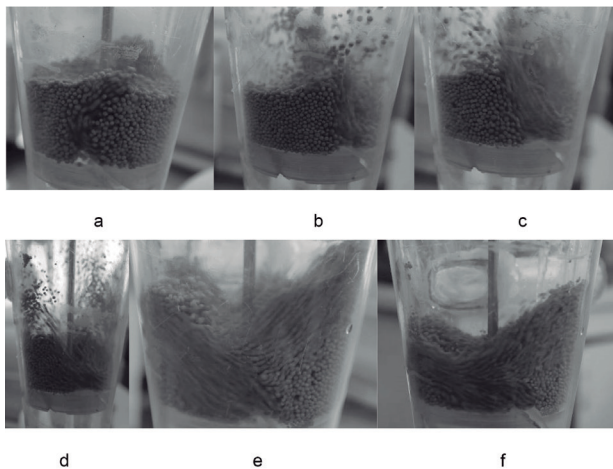


Figura 6. Modos de circulación de gránulos en el granulador de vórtice: a - circulación en la zona de turbulencia ($K_w = 1-1,5$); b - expansión del área de circulación ($K_w = 1,6-2,2$); c - comienzo del mezclado lateral ($K_w = 2,3-3$); d - mezclado lateral intensivo ($K_w = 3,1-3,5$); e - mezclado lateral intensivo y mezclado vertical parcial ($K_w = 3,6-4,2$); f - mezclado lateral intensivo y movimiento de los gránulos de la zona central hacia la periferia ($K_w = 4,3-5$).

En la condición de capa pesada de vórtice desarrollado [43] la trayectoria del movimiento de los gránulos en el espacio de trabajo del granulador de vórtice tiene una trayectoria espiral característica que se formada gradualmente en el proceso (ver Figura 7).

Así, al mismo tiempo, hay una clasificación polidispersa del material, aunque en dispositivos de forma cilíndrica se observa sólo en parte debido a la falta de un gradiente de la velocidad ascendente. En los dispositivos de cámara de trabajo cilíndrica, la clasificación del material es posible en el caso de un rango conside-

rable de tamaños (masas) de gránulos.

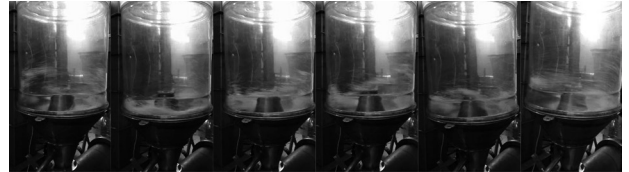


Figura 7: Granulador con cámara cilíndrica siguiendo un modo de funcionamiento (cambio de trayectorias de gránulos) para clasificación de gránulos.

La descripción teórica del proceso de clasificación por tamaño para granuladores cónicos con lecho suspendido de vórtice es dada en el trabajo [44], con una masa invariable de un gránulo sobre la base de equilibrio de las fuerzas que operan en un gránulo (Figura 8). Sobre la base del modelo matemático desarrollado, después de transformaciones, se calcula la altura del espacio de trabajo a la que habrá gránulos de un dado tamaño ante el cambio de su peso (debido a la humectación y el secado posterior, por ejemplo, en la producción de nitrato de amonio poroso):

$$Z = \frac{1,584}{\operatorname{tg} \varphi} \sqrt{\frac{Q}{\frac{m \cdot (1+U) \cdot g}{\psi \cdot \rho_{\text{gas}} \cdot r_{\text{gr}}}}} \quad (2)$$

$$Z_1 = Z - Z_0, \quad (3)$$

donde Q es el caudal de flujo gaseoso; m es la masa del granulo; U es el contenido de humedad; g es la aceleración de la gravedad; ψ es el coeficiente de arrastre; ρ_{gas} es la densidad del gas; r_{gr} es el radio del gránulo.

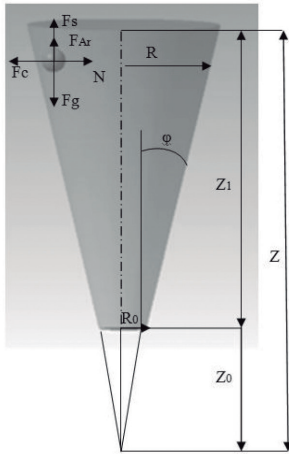


Figura 8. Esquema de cálculo del espacio de trabajo del granulador de vórtice [44]: Z, altura general de un cono; Z_0 , altura de instalación del dispositivo de distribución de gas; Z_1 , altura del espacio de trabajo del granulador; ϕ , la mitad del ángulo de expansión de cono; R_0 , radio del dispositivo de distribución de gas; R, radio del espacio de trabajo.

Los resultados del cálculo de la fórmula (2) se muestran en las Figuras 9 y 10. Los datos de los cálculos teóricos son confirmados por resultados experimentales. En la Figura 11 se aprecia que los gránulos de un dado tamaño ocupan una cierta altura en función de su grado de humedad.

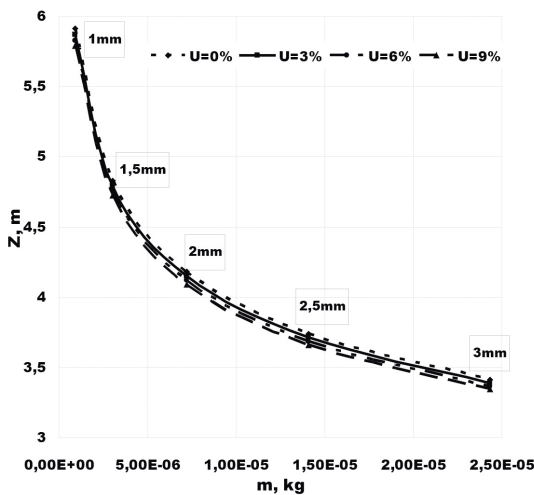


Figura 9. Clasificación de los gránulos en función del peso y del contenido de humedad a $Q=1 \text{ m}^3/\text{s}$, $\phi=14^\circ$ (Z según la Figura 8).

Cabe señalar que en caso de aplicación de la capa de vórtice para dispositivos de gran productividad (incremento en la altura de la cama de gránulos) hay un problema de circulación horizontal de los gránulos desde la zona central hacia la periferia del dispositivo. Es posible resolver este problema cuando se utilizan dispositivos con capa suspendida combinada (una capa de brote en el centro del dispositivo y una capa de vórtice en la periferia del dispositivo).

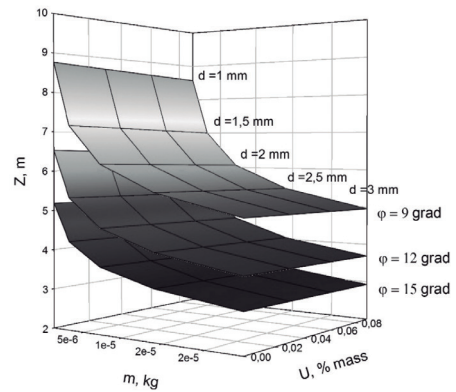


Figura 10. Clasificación de los gránulos en función del peso, del contenido de humedad y del ángulo del cono de expansión $Q=1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Z según la Figura 8).



Figura 11. Clasificación de los gránulos por peso en el espacio de trabajo del granulador de vórtice.

Los resultados de los estudios experimentales sobre la hidrodinámica de las condiciones de los granuladores de lecho combinado de vórtice se presentan en la Figura 12.

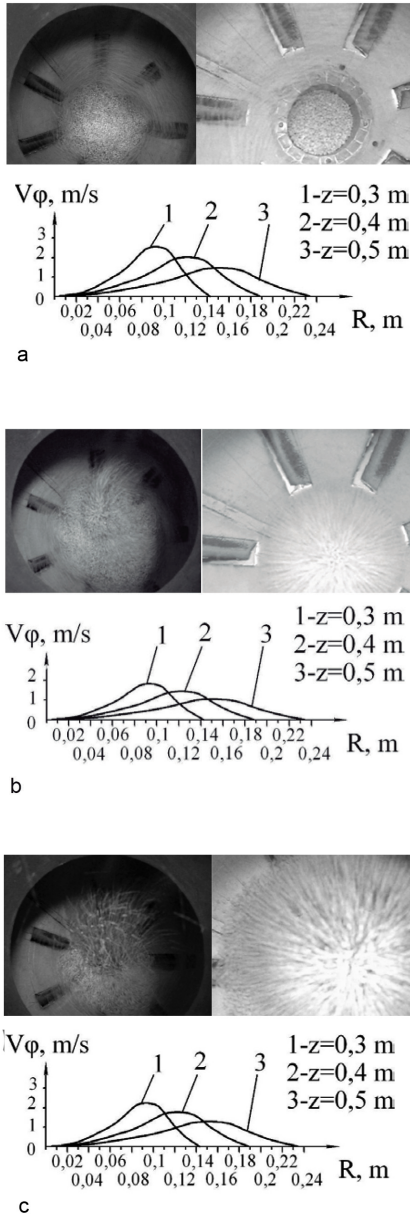


Figura 12. Trayectorias de los movimientos de los granúlos y la velocidad de la corriente de gas en el granulador de vórtice combinado con una capa suspendida. $Q=0,33 \text{ m}^3/\text{s}$: a) $Gz=0$; b) $G\phi/Gz=2,3$; c) $G\phi/Gz=1$.

En caso de usar solamente una capa vertedora suspendida, en la periferia del dispositivo se observan zonas de subvelocidad, existencia que ha sido confirmado con los resultados de modelos de computadora (Figura 13).

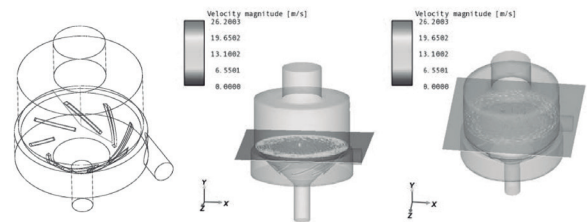


Figura 13. Simulación por computadora de la hidrodinámica del flujo de gas en un granulador de vórtice con lecho suspendido combinado.

CONCLUSIONES

Del análisis de bibliografía que describen el proceso de granulación en granuladores de capa suspendida se encontraron perspectivas de mejora adicional de este método y en el capital del equipo para el procesamiento.

Se establecieron características de mezclado lateral y circulación vertical de gránulos en las condiciones de capa parcialmente pesada y capa pesada con remolino parcial. Se mostró que, en los dispositivos cilíndricos, el proceso de clasificación de los gránulos puede llevarse a cabo bajo la condición de polidispersión de gránulos. El fenómeno de clasificación de los gránulos por diferencia de peso en dispositivos cónicos se describe teóricamente y fue experimentalmente validado. Los granuladores con capa suspendida de vórtice pueden trabajar con la máxima eficiencia en los dispositivos de una potencia baja y media. Para instalaciones de gran capacidad se dispone granuladores de vórtice con capa pesada combinada. Se estudió las características de la formación de capa pesada combinada y las condiciones operativas para su trabajo.

Las condiciones hidrodinámicas y termodinámicas de permanencia de un producto en la capa suspendida de vórtice difieren considerablemente de la capa suspendida clásica, por tanto, es necesario la realización de investiga-

ciones teóricas y prácticas con el propósito de la comprobación de dependencias cinéticas de crecimiento de los gránulos y la definición de las modalidades tecnológicas óptimas y parámetros geométricos del granulador.

REFERENCIAS

- Litster, J., Ennis, B. (2004). The science and engineering of granulation processes. Springer-Science+Business Media.*
- Yang, W-C. (2003). Handbook of fluidization and fluid-particle systems. New York: Marcel Dekker.*
- Gidaspow, D. (1994). Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions with applications. San Diego: Academic Press, Inc.*
- Kunii, D, Levenspiel, O. (1991). Fluidization engineering. Boston: Butterworth-Heinemann.*
- Kwauk, M. (1992). Fluidization: Idealized and Bubbleless, with Application. Beijing: Science Press; and New York: Ellis Horwood.*
- Gibilaro, L. (2001). Fluidization-dynamics. The formulation and applications of a predictive theory for the fluidized state. Woburn: Butterworth-Heinemann.*
- Pat. Nº 20110133839 KR (2011). Fluidized bed granulator.*
- Pat. Nº 201684575 CN (2010). Fluidized bed granulator.*
- Pat. Nº 101829521 CN (2010). Fluidized bed granulator.*
- Pat. Nº 201510861 CN (2010). Continuous fluidized bed spray granulator.*
- Pat. Nº 20090081235 KR (2009). Fluidized bed granulator.*
- Pat. Nº 2003117377 JP (2003). Fluidized bed compression granulator.*
- Pat. Nº 2002361066 JP (2002). Fluidized bed granulator.*
- Pat. Nº 201434561 CN (2010). Machine for continuous spraying, fluidizing, granulating and drying.*
- Pat. Nº 20040048861 KR (2004). Process for producing anhydrous alkali sulfide dried by fluidized bed spray granulation and device therefore.*
- Pat. Nº 2790 JO (2014). Apparatus for producing nitrate granules.*
- Pat. Nº 1407814 DK (2014). Process and apparatus with a fluidised bed apparatus for producing granules.*
- Pat. Nº 102005037630 DE (2007). Verfahren zur Herstellung von Teilchen aus pharmazeutischen Substanzen, Teilchen aus pharmazeutischen Substanzen sowie deren*

Verwendung.

Pat. Nº 102013102133 DE (2014). Wirbelschicht-Trockner mit mehreren Kammern.

Pat. Nº 3004124 FR (2014). Procédé de granulation et enrobage en lits fluidisés continus-dispositifs techniques.

Pat. Nº 2400924 ES (2013). A fluid bed apparatus for coating solid particles.

Pat. Nº 2011056348 JP (2011). Fluidized bed treating method and fluidized bed apparatus.

Pat. Nº 2012028894 WO (2012). Fluid bed apparatus and method for processing a particulate material.

Pat. Nº 1513609 DK (2010). Fluidized bed process and apparatus.

Pat. Nº 438459 AT (2009). Fluid bed apparatus module and method of changing a first module for a second module in a fluid bed apparatus.

Pat. Nº 7534278 US (2009). Granulator device for the treatment of powdered products.

Pat. Nº 8708551 US (2014). Continuous granulator and method of continuous granulation of powder material.

Pat. Nº 1698393 EP (2006). Process and device for fluidized bed granulation.

Pat. Nº 6492024 US (2002). Precision granulation.

Pat. Nº 6680032 US (2004). Process and apparatus for preparing granules.

Pat. Nº 2011/0220745 US (2011). Dry granulation in gas stream.

Crowe, C. (2006). *Multiphase flow handbook*. New York: Taylor & Francis Group, LLC.

Yang, W-C. (1998). *Fluidization, solids handling, and processing*. Westwood: Noyes Publications.

Lipsanen, T. (2008). *Process analytical technology approach on fluid bed granulation and drying: identifying critical relationships and constructing the design*

space. Helsinki: University Printing House.

Kaewklum, R., Kuprianov, V. (2010). *Experimental studies on a novel swirling fluidized-bed combustor using an annular spiral air distributor* *Fuel*, 89, 43–52.

Zibert, G., Sedykh, A., Savitskiy, Y., Mikhaylov, N., Demin, V. (2001). *Preparation and refining of hydrocarbon gas and condensate. Technology and equipment*. Moscow: Nedra business-center.

Voynov, N., Nikolaev, N., Kustod, F., Nikolaev, A., Tarovaty, D. (2008). *Vortex contact stages for rectification. Chemistry of plant raw materials*, 3, 73-184.

Levchenko, D., Arseniev, V., Meleychuk, S. (2012). *Regime characteristics of vacuum unit with a vortex ejector stage with different geometry of its flow path. Procedia Engineering*, 39, 28–34.

Chernysh, N. (2010). *Theory and calculation of ideal vortex devices*. Minsk: Medisont Ltd.

Ashcraft, R., Heynderickx, G., Marin, G. (2012). *Modeling fast biomass pyrolysis in a gas–solid vortex reactor. Chemical Engineering Journal*, 207–208, 195–208.

Belousov, A. (2010). *Hydrodynamics of processes with variable structures of swirling heterogeneous flows in vortex devices*. D.Sc. Thesis.

Kaewklum, R. Kuprianov, V. (2008). *Theoretical and experimental study on hydrodynamic characteristics of fluidization in air–sand conical beds. Chemical Engineering Science*, 63, 1471–1479.

Moskalenko, K., Vedmedera, V., Artyukhov, A. (2015). *Research of the work regimes of vortex weighted layer in the granulator. Acta Universitatis Pontica Euxinus*, II, 122-126.

Artyukhov, A., Fursa, A., Moskalenko, K. (2015). *Classification and separation of granules in vortex granulators. Chemical and Petroleum Engineering*, 51 (5–6), 311–318.