

УДК 66.096.5

Корнієнко Ярослав Микитович

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою машин та апаратів
хімічних і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”

Гайдай Сергій Сергійович

аспірант кафедри машин та апаратів хімічних і
нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”

Любека Андрій Миколаєвич

аспірант кафедри машин та апаратів хімічних і
нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”

Турко Сергій Олександрович

магістрант кафедри машин та апаратів хімічних і
нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”

Корниенко Ярослав Никитович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и
аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств
Национальный технический университет Украины
“Киевский политехнический институт”

Гайдай Сергей Сергеевич

аспирант кафедры машин и аппаратов химических и
нефтеперерабатывающих производств
Национальный технический университет Украины
“Киевский политехнический институт”

Любэка Андрей Николаевич

аспирант кафедры машин и аппаратов химических и
нефтеперерабатывающих производств
Национальный технический университет Украины
“Киевский политехнический институт”

Турко Сергей Александрович

магистрант кафедры машин и аппаратов химических и
нефтеперерабатывающих производств
Национальный технический университет Украины
“Киевский политехнический институт”

Kornienko Y.

PhD, Professor
Head of Department of machines and apparatus of chemical and petroleum
industries National Technical University of Ukraine
"Kyiv Polytechnic Institute"

Gaidai S.

Graduate of Department of machines and apparatus of chemical and
petroleum industries National Technical University of Ukraine
"Kyiv Polytechnic Institute"

Liubek A.

Graduate of Department of machines and apparatus of chemical and
petroleum industries National Technical University of Ukraine
"Kyiv Polytechnic Institute"

Turko S.

Master of Department of machines and apparatus of chemical and petroleum
industries National Technical University of Ukraine
"Kyiv Polytechnic Institute"

**ГІДРОДИНАМІКА СТРУМЕНЕВО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО РЕЖИМУ
ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ З НАПРАВЛЕНОЮ ЦИРКУЛЯЦІЄЮ
ГИДРОДИНАМИКА СТРУЙНО-ПУЛЬСАЦИОННОГО РЕЖИМА
ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ С НАПРАВЛЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ
PULSE JET-MODE HYDRODYNAMICS FLUIDIZATION WITH
DIRECTED CIRCULATION**

Анотація: Основною умовою для одержання гранульованого продукту з пошаровою структурою є активне залучення всієї поверхні зернистого матеріалу, що знаходиться в псевдозрідженому шарі при зневодненні композитних рідких систем, що містять більше 50% розчинника, чого неможливо досягнути при традиційному барботажному режимі не дозволяє ефективно вирішити це завдання. Тому застосування струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження з направленою циркуляцією зернистого матеріалу з метою інтенсифікації процесу за рахунок створення трьохмірного перемішування та запобіганню утворенню застійних зон є актуальним.

Ключові слова: псевдозріджений шар, гідродинаміка, струменево-пульсаційний режим, грануляція.

Аннотация: Основным условием для получения гранулированного продукта с послойной структурой является активное привлечение всей поверхности зернистого материала, находящегося в псевдоожигенном слое при обезвоживании композитных жидких систем, содержащих более 50% растворителя, чего невозможно достичь при традиционном барботажном ре-

жиме не позволяет эффективно решить эту задачу. Поэтому применение струйно-пульсационного режима псевдооживления с направленной циркуляцией зернистого материала с целью интенсификации процесса за счет создания трехмерного переперемешивания и предотвращению образования застойных зон является актуальным.

Ключевые слова: псевдооживленный слой, гидродинамика, струйно-пульсационный режим, грануляция.

Abstract: The basic condition for obtaining granular product with layered structure is the active involvement of the entire surface of the granular material located in the fluidized bed with dehydration composite liquid systems containing more than 50% of the solvent, which can not be achieved with traditional bubbling mode can not effectively solve this problem. Therefore, the use of spray and pulsating regime fluidization of granular material circulation directed to intensify the process by creating three dimensional mixing and prevent the formation of dead zones is relevant.

Keywords: fluidized bed, hydrodynamics, jet-pulsating mode, granulation.

Постановка проблеми. Застосування техніки псевдозрідження в промисловості для сушіння, кристалізації, гранулювання набуло великого поширення. Завдяки інтенсивному перемішуванню твердих частинок в псевдозрідженому шарі практично вирівнюється поле температур, усувається можливість значних локальних перегрівів і зв'язаних з цим порушень при проходженні технологічного процесу [1], тому для проведення процесів зневоднення та грануляції гуміново-мінеральних добрив з їх насичених висококонцентрованих водних розчинів, найбільш доцільно застосовувати гранулювання в псевдозрідженому шарі. Однак поряд з перевагами, псевдозрідженому шару властиві і недоліки, так наприклад, викликане інтенсивним перемішуванням твердих частинок вирівнювання температур і концентрацій в шарі призводить до зменшення рушійної сили процесу, утво-

рення застійних зон та можливість проскоку значної кількості газу без достатнього контакту з твердими частинками зменшує вихід цільового продукту [2].

Вивченням та дослідженням техніки псевдозрідження, закономірностями формування псевдозрідженого шару, впливом параметрів на псевдозрідження займалося та займається багато видатних вчених, які внесли великий внесок в розвиток промисловості та залишили після себе велику наукову базу у вигляді наукових праць та монографій [3-8]. Розробленням апаратів для проведення процесу псевдозрідження займається велика кількість сучасних світових компаній, таких як Glatt, Inprotec AG, GEA Pharma Systems та інші [9-11].

Загальною науковою проблемою є підвищення ефективності процесу утворення твердих гуміново-мінеральних композитів із пошаровою структурою шляхом зневоднення та гранулювання гетерогенних рідких систем у псевдозрідженому шарі, яка визначається гідродинамічним режимом псевдозрідження з урахуванням особливостей масообміну при масовій кристалізації.

Тому розроблення спеціального газорозподільного пристрою (ГРП), який дозволить забезпечити струменево-пульсаційний режим псевдозрідження з направленою циркуляцією та об'ємним перемішуванням зернистого матеріалу без утворення застійних зон на поверхні ГРП є актуальним.

Метою експериментальних досліджень є визначення ефективності застосування розробленого газорозподільного пристрою та його вплив на гідродинамічний режим псевдозрідження.

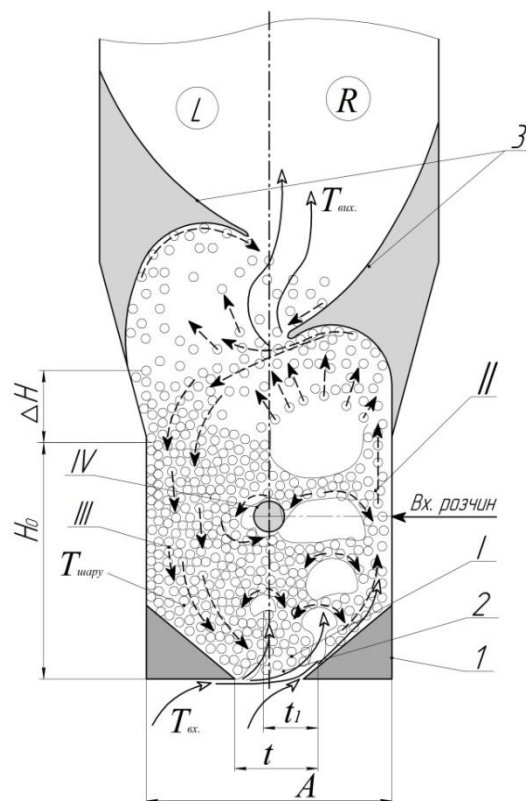
Дослідження гідродинаміки проводилися на пілотній установці з розмірами камери гранулятора $0,1 \times 0,3 \times 0,8$ м, висотою шару в апараті $H_0 = 0,3$ м (рис.1), еквівалентним діаметром частинок у шарі $D_e = 2,3 \cdot 10^{-3}$ м, температурою зріджувального агента $T = 20^\circ\text{C}$ та загальною поверхнею частинок у шарі $f_{\text{ш}} = 11,58 \text{ м}^2$ при застосовуванні ГРП щі-

линного типу із кроком між щілинами, по відношенню до ширини апарата, $t=0,4A$.

Для створення струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження застосовувався ГРП щілинного типу із кроком між щілинами по відношенню до ширини апарата $t=0,4A$ та коефіцієнтом живого перетину $\varphi = 5\%$.

Створення вертикально направленого струменя в нижній частині апарату із подальшим утворенням газових бульбашок великих розмірів забезпечує активний рух частинок у шарі, які циркулюють, послідовно проходять в зони інтенсивного тепломасообміну I, висхідного руху II, релаксації III та в горизонтальній площині зони зрошення IV (рис. 1). Такий рух матеріалу досягається завдяки встановленню у верхній частині камери гранулятора 1 направляючої вставки 3 (рис.1).

Фізичну модель взаємодії газового струменя з твердими частинками у камері гранулятора, спорядженого ГРП 2 та направляючими вставками 3, наведено на рис. 1.



1 – камера гранулятора; 2 – газорозподільний пристрій; 3 – направляючі вставки; I – зона інтенсивного тепломасообміну; II – зона висхідного потоку; III – зона низхідного потоку; IV- зона зрошення

Рис. 1 - Організація руху зернистого матеріалу в апараті

Для забезпечення інтенсивного об'ємного перемішування зернистого матеріалу з його поступовим проходженням через всі технологічні зони, необхідно забезпечити утворення газових бульбашок на мінімальній відстані t_1 . Це досягається тим, що утворюються генеруючі струменем із ГРП газові бульбашки зливаються з утворенням збільшеної бульбашки з великим початковим імпульсом. В результаті цього, відбувається пульсаційне збільшення висоти шару в лівій частині (L) на величину ΔH по відношенню до H_0 (рис. 1) [12].

Збільшення гідравлічного опору в лівій частині камери гранулятора (L) рис. 1, призводить до зміщення руху траєкторії газової бульбашки вправо (R) рис.1 і створення локального поршневого режиму, це в свою чергу призводить до переміщення значної маси зернистого матеріалу зі швидкістю близькою до швидкості виносу зернистого матеріалу.

Згідно з [12], мінімальна відстань t_1 для злиття двох бульбашок визначається як:

$$t_1 \approx 2 \cdot X_{\text{гор}},$$

при цьому:

$$X_{\text{гор}} = \frac{W_{\Gamma} r_o}{0,585 W_v C_1},$$
$$r_o = \frac{2F}{\Pi},$$

де $X_{\text{гор}}$ - далекобійність струменя в горизонтальному напрямку; W_{Γ} – швидкість зріджувального агента у щілинах ГРП; r_o – приведений радіус щілини; W_v – швидкість зріджувального агента у верхній точці факела; C_1 – коефіцієнт; F – площа щілини ГРП; Π – периметр щілини ГРП.

Відповідно до припущень [12] при реалізації горизонтального руху газового струменя через щілини ГРП, газовий струмінь рухається у горизонтальному напрямку до відстані $X_{\text{гор}}$ від щілини (рис. 2), з наступним плавним переходом у вертикальному напрямі і утворює факел, при цьому

$\frac{Y_f}{H_0} \ll 0,3$. Висота шару $H_0 = 0,3$ м визначалася експериментально з умов масообміну.

Разом з тим, на горизонтальній поверхні ГРП між вертикально направленими газовими факелами $Y_{f1} \approx Y_{f2}$ при недостатній далекобійності струменя $X_{гор}$ утворюється застійна зона Б, в якій при високих температурах теплоносія на вході до апарата $T_{вх}$ спричинює плавлення матеріалу.

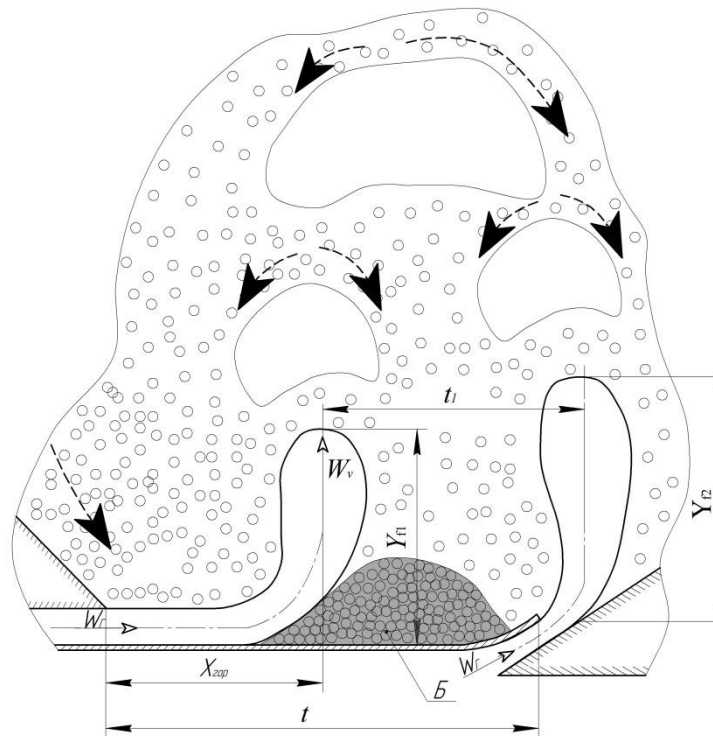
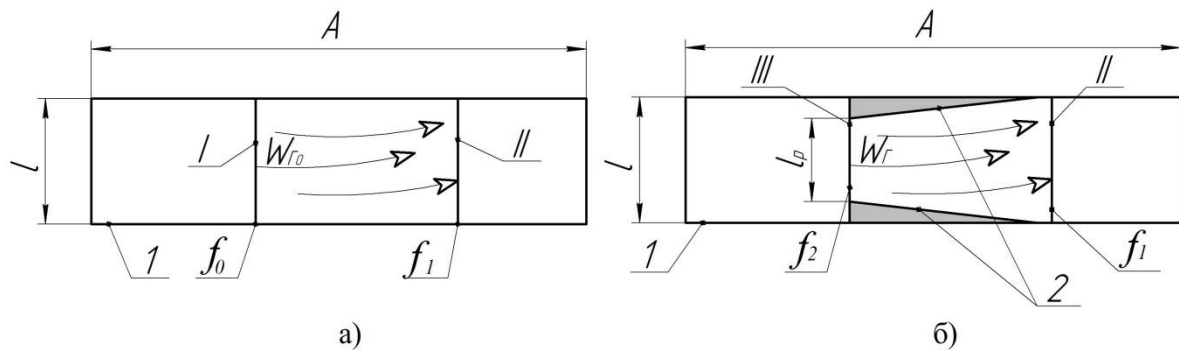


Рис. 2 - Схематичне зображення горизонтального підведення газового струменя

Запобігти утворенню застійної зони на поверхні пластини ГРП, можна збільшивши далекобійність струменя в горизонтальному напрямку $X_{гор}$, за рахунок підвищення швидкості зріджуючого агента W_r в першій щілині ГРП I з площею поперечного перерізу f_0 (рис. 3, а). Шляхом встановлення звужуючих вставок 2 (рис. 3, б), при незмінній висоті щілини, ширина щілини III з площею поперечного перерізу f_2 зменшується на 30%, тобто відношення довжини звуженої щілини до початкової становить $l_p/l = 0,7$, що зумовило одночасне збільшення швидкості газового струменя на виході зі

щілини III (рис. 3, б) і відповідно збільшити далекобійність струменя в горизонтальному напрямі.



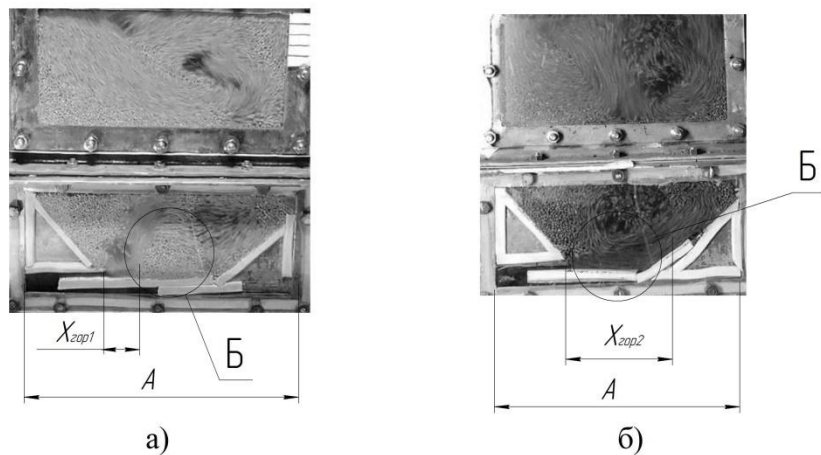
а – двох щілинне ГРП без звужуючих вставок; б – двох щілинне ГРП зі звужуючими вставками
1 – корпус; 2 – звужуючі вставки; I – перша щілина; II – друга щілина;
III – зменшена на 30% ширина першої щілини

Рис. 3 - Газорозподільний пристрій апарата псевдозрідженого шару – вид зверху

Застосування розробленої конструкції ГРП дозволило усунути застійну зону, утворювану при застосуванні ГРП без звужуючих вставок.

Результати візуальних спостережень інтенсивного перемішування при реалізації струменево-пульсаційного режиму у випадку використання ГРП в апараті без звужуючих вставок (рис. 4, а), та з вставками (рис. 4, б), наведено у вигляді фотографій, за однакових умов, а саме: перепад тиску в шарі $\Delta P_{\text{ш}} = 1962$ Па, об'ємні витрати зріджуючого агента $V = 0,03736$ м³/с при середній розрахунковій швидкості в щілинах $W_{\text{щ}} = 24,9$ м/с.

Наведені результати досліджень при застосуванні ГРП зі звужуючими вставками підтверджують відсутність застійних зон у зоні інтенсивного тепломасообміну Б (рис. 4, б) при реалізації струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження, що можна пояснити підвищенням локальної швидкості зріджуючого агента при проходженні через звужуючі вставки і відповідно збільшенням далекобійності струменя в горизонтальному напрямку $X_{\text{гор}2} \approx 2X_{\text{гор}1}$ за рахунок збільшення швидкості, що в 2 рази перевищує швидкість виносу частинок з $D_e = 2,3 \cdot 10^{-3}$ м.



а) – ГРП без звужуючих вставок; б – ГРП зі звужуючими вставками
Б – зона інтенсивного тепломасообміну

Рис. 4 - Реалізація струменево-барботажного режиму

Розвиток факела та рух бульбашок в шарі зернистого матеріалу при збільшенні швидкості зріджуючого агента W_r в щілинах зображено на рис. 5.

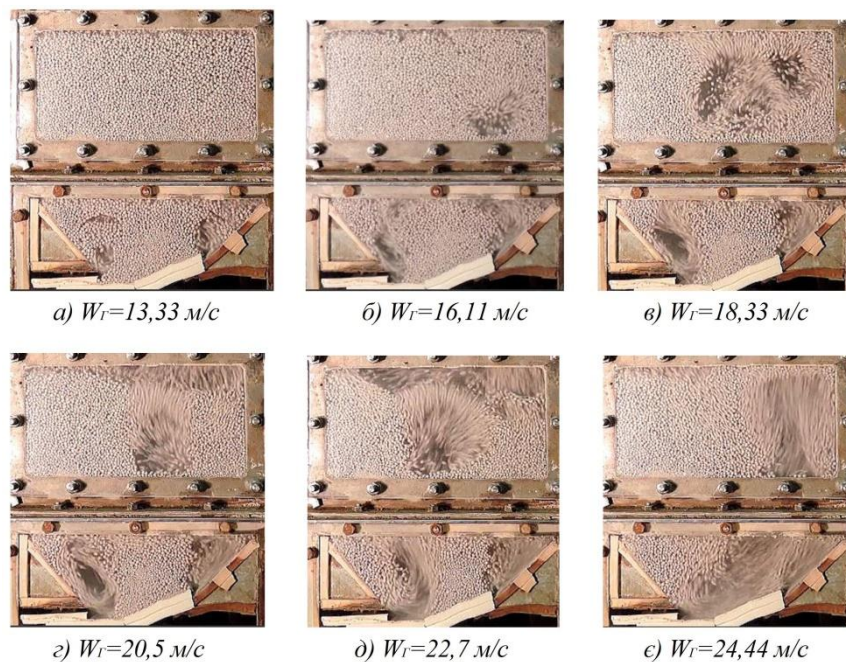


Рис. 5 - Розвиток руху факела в шарі при збільшенні швидкості зріджуючого агента W_r при $H_0 = 0,3$ м та $D_e = 2,3 \cdot 10^{-3}$ м

Експериментальна залежність далекобійності струменя в горизонтальному напрямку від швидкості газу в щілинах ГРП наведена на рис. 6.

Наведені експериментальні дані показують, що для усунення застійної зони на ГРП, швидкість газу в щілинах повинна бути $W_{щ} \geq 25$ м/с.

Цей висновок підтверджується епіюрами швидкостей для двох типів ГРП, виконавши моделювання процесу в програмному середовищі Solid-Works (рис. 7, а) та (рис. 7, б), які показують зміну швидкостей в зоні ГРП від 13 до 21 м/с.

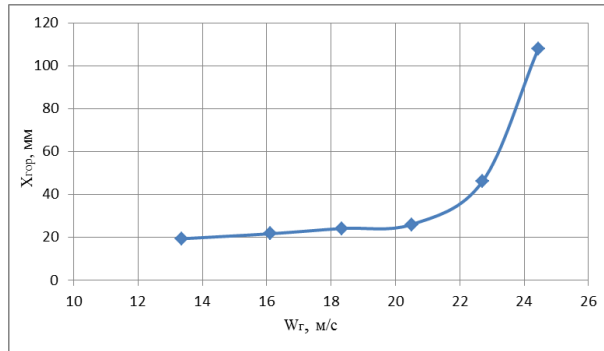
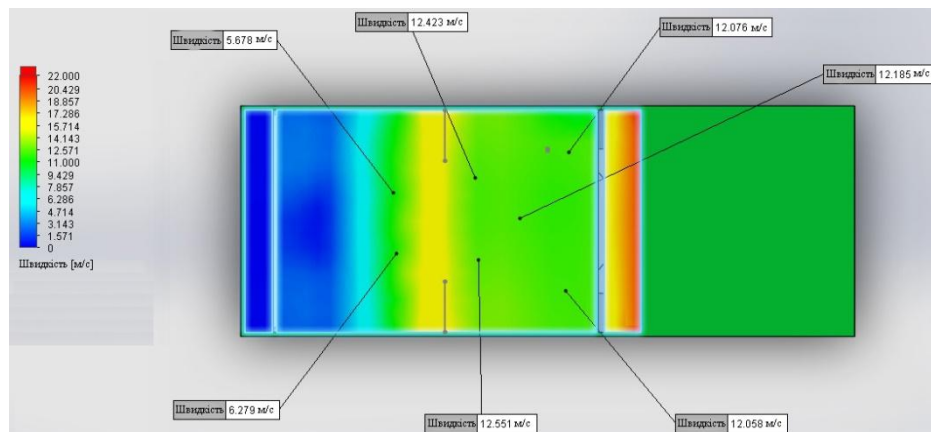
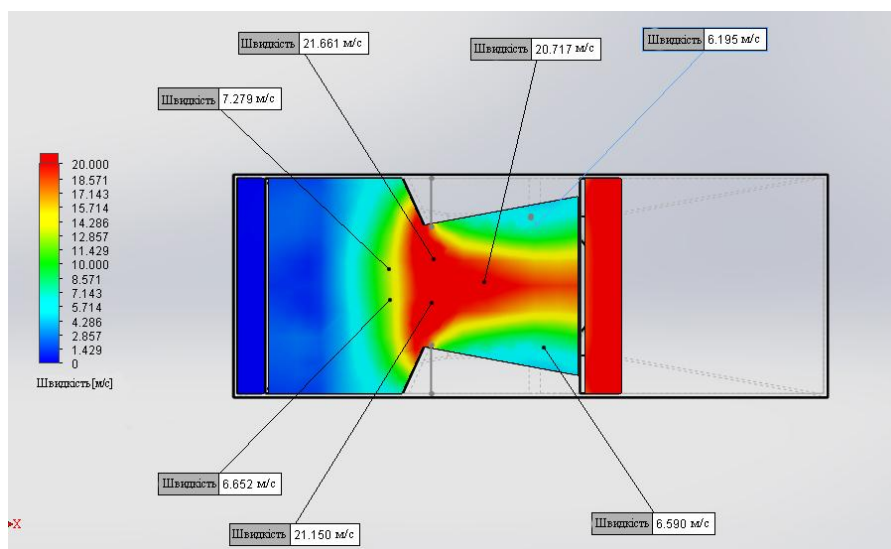


Рис. 6 - Залежність далькості газового струменя в горизонтальному напрямку від швидкості газу в щілинах ГРП



а)



б)

а – ГРП без звужуючих вставок; б – ГРП зі звужуючими вставками
Рис. 7 - Епіюри швидкостей зріджуючого агента на поверхні ГРП

Застосування щілинного ГРП зі звужуючими вставками при проведенні процесу зневоднення та гранулювання розчинів сульфату амонію з домішками гумінових речовин дозволило отримати гранульований продукт з пошаровою структурою розміром 1,8-3,0 мм, міцністю більше 10 Н на гранулу. При цьому, температура на вході до апарату підтримувалась $T_{\text{вх}} = 180 - 200^{\circ}\text{C}$, температура в шарі $T_{\text{ш}} = 93 - 97^{\circ}\text{C}$, процес характеризувався стійкою кінетикою і відсутністю зон наплавлення на поверхні ГРП після проведення процесу. Досягнуто питоме навантаження поверхні шару $a_f = 0,8 - 0,9 \frac{\text{кг вологи}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}$, що в два рази перевищує цей показник для барботажного режиму псевдозрідження.

Висновки. Застосування асиметричного введення теплоносія до камери гранулятора спорядженого ГРП щілинного типу та направляючою вставкою дозволило на високих значеннях висоти нерухомого шару $H_0 = 0,3 \text{ м}$ та $D_e = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ при значеннях відношення висоти факела Y_f до $H_0 \rightarrow \frac{Y_f}{H_0} = 0,3$ досягти реалізації струменево-пульсаційного режиму. На висоті 0,1-0,15 м від поверхні ГРП утворювалось злиття бульбашок, об'єм яких становив $1/3$ об'єму шару, що призводить до макроперенесення твердих частинок у вертикальному напрямку та створення значних дотичних напружень в горизонтальних площинах. В результаті спостерігалось інтенсивне трьохвимірне перемішування матеріалу в апараті.

Теоретично обґрунтовано та експериментально визначено умови при яких усувається утворення застійних зон на горизонтальних елементах ГРП.

Експериментально встановлено, що застосування струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження дозволяє збільшити в 2 рази питоме навантаження шару за вологою в порівнянні з барботажним режимом, при коефіцієнті гранулоутворення $\psi \geq 90\%$ і пошаровому механізмі гранулоутворення.

Література

1. Классен П.В., Гришаев И.Г. Основы техники гранулирования (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии). - М. Химия, 1982. -272 с., ил.
2. Псевдоожижение / Под ред. В. Г. Айнштейна, А. П. Баскакова. - М.: Химия, 1991. - 400 с.
3. Дэвидсон Дж., Харрисон Д. Псевдоожижение: Пер. с англ. - М.: Химия, 1974. - 725 с.
4. Гельперин Н.И. Основы техники псевдоожижения / Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. - М.: Химия, 1967. - 664 с.
5. Аэров М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным зернистым слоем./ Аэров М.Э., Тодес О.М. - Л.: Химия. 1968. - 510 с.
6. Кунии Д. Промышленное псевдоожижение / Д. Кунии, О. Левеншпиль; пер. с англ. под ред. Слинько М.Г. и Яблонского Г.С. - М.: Химия, 1976.- 448 с.
7. Ханик Я.М. Гідродинаміка і кінетика процесу сушіння дрібнодисперсних матеріалів у щільному шарі/Я.М.Ханик, В.М.Кузьма,О.В. Ковальчук//Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2007. - № 4.- С.48-51.
8. Корнієнко Я. М., Сачок Р. В. Х89 Процес гранулоутворення мінерально-гумінових добрив: Монографія. [Електронне видання]. 158 с.: іл.
9. Технологии грануляции компании Glatt. - [Електронний ресурс]. - <http://www.glatt.com>
10. Fluid Bed Technology. - [Електронний ресурс]. - <http://www.inprotec-ag.de/>
11. High shear granulators. - [Електронний ресурс]. - <http://www.gea.com/ru/ru/products/gral-ultimagral.jsp>

12. Бувевич Ю.А., Минаев Г.А.. Струйное псевдооживление. - М.: Химия, 1984. - 136 с., ил.