УДК 66.096.5

КОРНІЄНКО Я. М., д.т.н., проф.; ЛЮБЕКА А. М., аспірант.; ДЕНИСЕНКО В. Р., магістрант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В АПАРАТІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ

Авторами запропонована методика дослідження температурного поля при гранулюванні гуміново-мінеральних добрив, розроблення карта термопар для визначення зміни температури по висоті апарату.

Ключові слова: *диспергатор, частинка, гранулювання, псевдозріджений шар, розподілення.*

© Корнієнко Я. М., Любека А. М., Денисенко В. Р., 2018.

Постановка проблеми. В сучасних умовах широко застосовуються технології для одержання твердих композитів із заданими властивостями, які мають відповідну морфологію, що забезпечує рівномірне розподілення мінеральних та органічних компонентів по всьому об'єму твердої частинки. На думку авторів [1] в залежності від способу введення робочого розчину, властивостей компонентів та інтенсивності теплообмінних процесів можна одержати тверді частинки із щільною, пористою, «малиноподібною» або «тороподібною» структурою. Ефективність таких процесів визначається коефіцієнтом гранулоутворення, який показує частку сухих речовин які надходять в апарат з робочим розчином і трансформуються в гранульований продукт. Цей параметр визначається:

- Гідродинамічним режимом псевдо зрідження, який забезпечує ефективне протікання тепло-масообмінних процесів
- Способом введення рідкої фази (гомогенної або гетерогенної), яка по суті визначає механізм гранулоутворення.

Широкий діапазон властивостей компонентів в рідкій фазі, реологічні та фізико-хімічні властивості визначають великий сектор способів конструкцій диспергаторів [1].

В останні роки для впровадження принципів сталого розвитку щодо раціонального землекористування актуальним науково-технічним завданням стало створення орано – мінеральних добрив нового покоління і сировина, що є відходами хімічної та харчової промисловості.

Тобто до водних розчинів сульфату амонію, що утворюється при виробництві капролактаму додають гумінові речовини та інші поживні речовини зокрема кістяне борошно в розчиненому або суспендованому вигляді, які при гранулюванні в псевдозрідженому шарі дозволяють одержати продукти з пошаровою структурою.

До основних вимог гранульованих гуміно–мінеральних добрив відноситься рівномірне розподілення гумінових речовин у вигляді колоїдних частинок по всьому об'єму гранул вміст яких не перевищує 2%(мас.)

Аналіз попередніх досліджень. В роботах [2] наведені різні способи подачі однорідної рідкої фази за допомогою різного типу форсунок розташованих над або у шарі зернистого матеріалу.

Проте такий процес гранулоутворення є стохастичним в якому частіше реалізується агломераційний механізм і тому використовується при зневодненні моносистем.

Аналогічний результат досягається при застосування механічних високошвидкісних диспергаторів, які встановлюються над шаром зернистого матеріалу [2].

Для забезпечення пошарового механізму гранулоутворення в багатьох випадках застосовують «Wurnts» технологію, яка полягає у розташуванні в апараті з псевдозрідженим шаром вертикальних труб через які здійснюється направлена циркуляція зернистого матеріалу в режимі пневмотранспорту.

В нижній частині труби коаксіально розташована форсунка для розпилення рідкої фази. На думку авторів [4] реологічні властивості такої дисперсії дещо погіршується, негативно впливає на стійкість процесу. Тому для забезпечення заданої продуктивності число таких систем збільшується. В реальних умовах це ускладнює контроль за роботою окремих блоків диспергування, а для розподілення гетерогенних систем взагалі є неприйнятною. Окрім того, при такому способі введення рідкої фази суттєво зростає локальний ризик перезволоження твердих частинок, тому що концентрація твердих частинок у висхідному вертикальному потоці в режимі пневмотранспорту є мінімальною (порозність $\varepsilon \geq 0{,}8$).

Разом з тим в таких апаратах має місце недостатня інтенсивність перемішування, а отже не повне використання існуючої поверхні зернистого матеріалу в процесах тепло-масообміну.

Метою цієї статті було визначення впливу механічного диспергатора на температурне розподілення при одержанні гуміново-азотних добрив з пошаровою структурою.

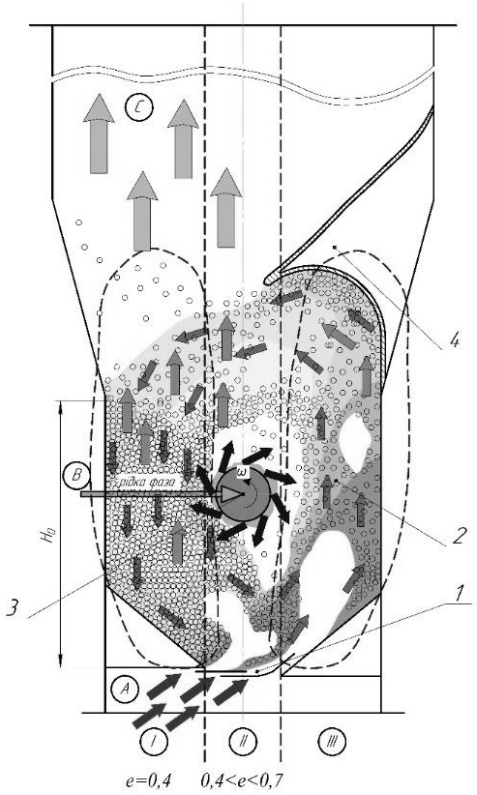
Виклад основного матеріалу. В роботах [3] визначені умови реалізації струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження в автоколивальному режимі, який забезпечує з частотою 1,6-1,9 Гц інтенсивне перемішування зернистого матеріалу в шарі шляхом винесення до 45% маси шари за межі початкового шару.

Проведені дослідження [3] показали, в робочому режимі струменево пульсаційного псевдозрідження в апараті рисунок 1, можна виділити з точки зору гідродинаміки.

I – зона низхідного руху зернистого матеріалу в яку завдяки асиметричного введенню теплоносія (зріджуючого агенту) відбувається переміщення зернистого матеріалу внаслідок інерційного винесення із зони II і III у верхній частині зони I. Порозність шару в цій зоні практично є сталою $\varepsilon_I = \varepsilon_0 = 0{,}4$, тому що висота шару в цей момент збільшується в $(1{,}7 \div 2)H_0$.

II – межова зона в якій відбувається 3D перемішування зернистого матеріалу внаслідок руху внаслідок руху газових бульбашок та переміщень на їх місце зернистого матеріалу в основному із зони I. Порозність в цій зоні змінюється циклічно $\varepsilon_I = 0{,}45 \rightarrow 0{,}68 \rightarrow 0{,}45$. В середині цієї зони на висот; $0{,}45H_0$ від поверхні ГРП розташований механічний диспергатор, конічного типу з розмірами $D_б = 80$ мм, $D_м = 40$ мм та довжиною 47 мм.

III – в зоні 3 відбувається активне об'єднання газових струменів, що виходять з ГРП і призводить до утворення газової бульбашки в момент початку руху газової бульбашки у вертикальному напрямку її об'єм практично повністю заповнює перетин зони III, що призводить до інерційного винесення значної кількості зернистого матеріалу в надшаровий простір, при взаємодії із вставкою 4, переміщується в зону I. Таким чином в зоні III утворюється активний висхідний рух зернистого матеріалу, який характеризується циклічною зміною порозності $\varepsilon = 0{,}45 \div 0{,}75$.



1 – газорозподільчий пристрій, 2 – камера гранулятора, 3 – механічний диспергатор, 4 – направляюча вставка
A – подача нагрітого теплоносія, B – подача рідкої фази до диспергатора, C – відведення відпрацьованого теплоносія із псевдозрідженого шару, H_0 – висота початкового нерухомого шару в апараті

Рис. 1 – Схема взаємодії газового суцільного середовища із зернистим матеріалом

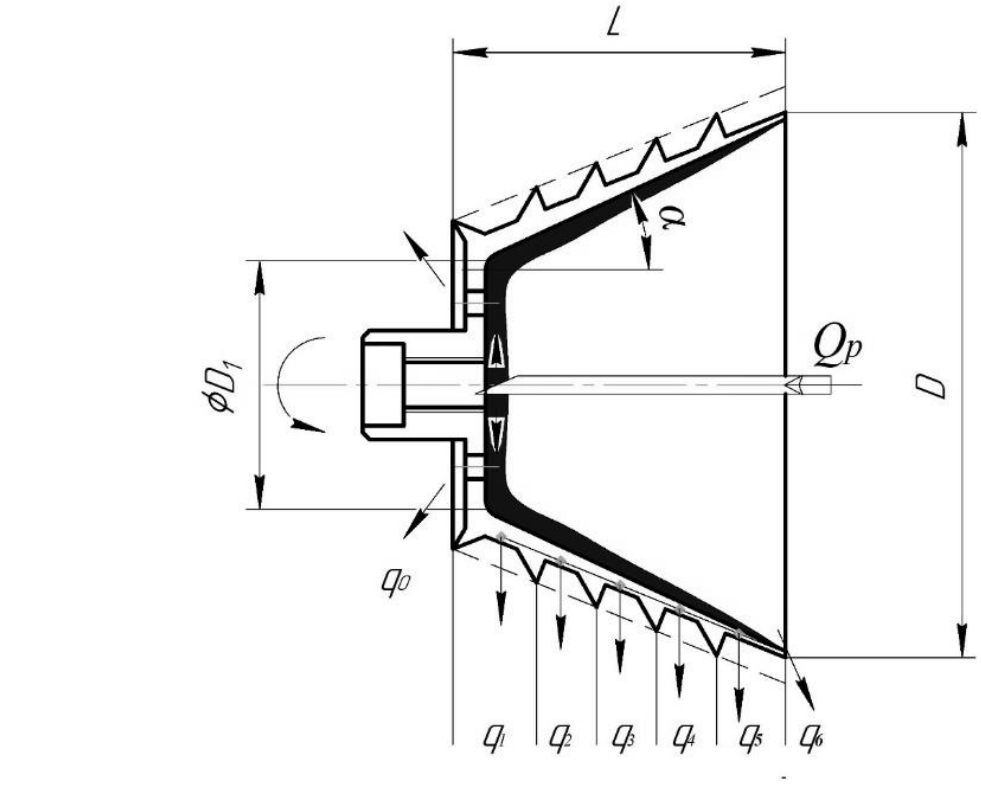
Тривалість циклу знаходиться в межах $0{,}56 \leq \tau_ц \leq 1{,}0$ с. в залежності від початкової висоти шару H_0.

Враховуючи характер руху зерна матеріалу в апараті напрям обертання механічного диспергатора співпадає з напрямом циркуляції зернистого матеріалу в камері гранулятора.

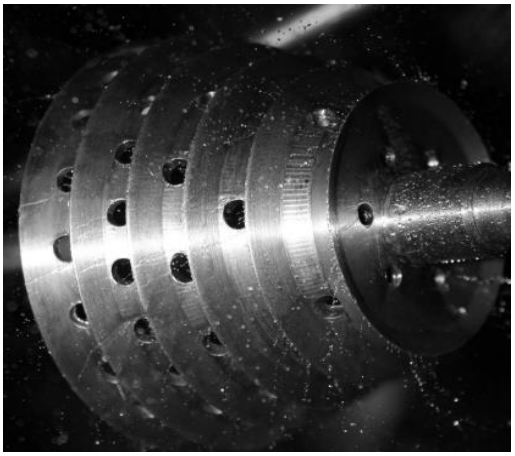
Досліди проводились в апараті, що має характер паралелепіпеда з розмірами AxBxH = 0,3x0,1x1,2 м.

Попередніми дослідженнями встановлено, що більш рівномірне розподілення рідини по довжині має конічний диспергатор типу 2 з відбійними кільцями виконаний з нержавіючої сталі рисунок 2.

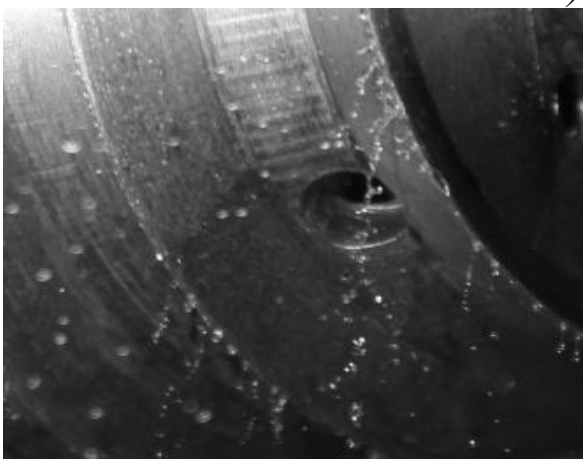
На рисунку 2 характер роботи диспергування на експериментальному стенді при лінійній швидкості крайки диспергатора $w_л = 9$ м/с, яка зменшується пропорційно із зменшенням радіусу відбійних кілець.



а)



б)

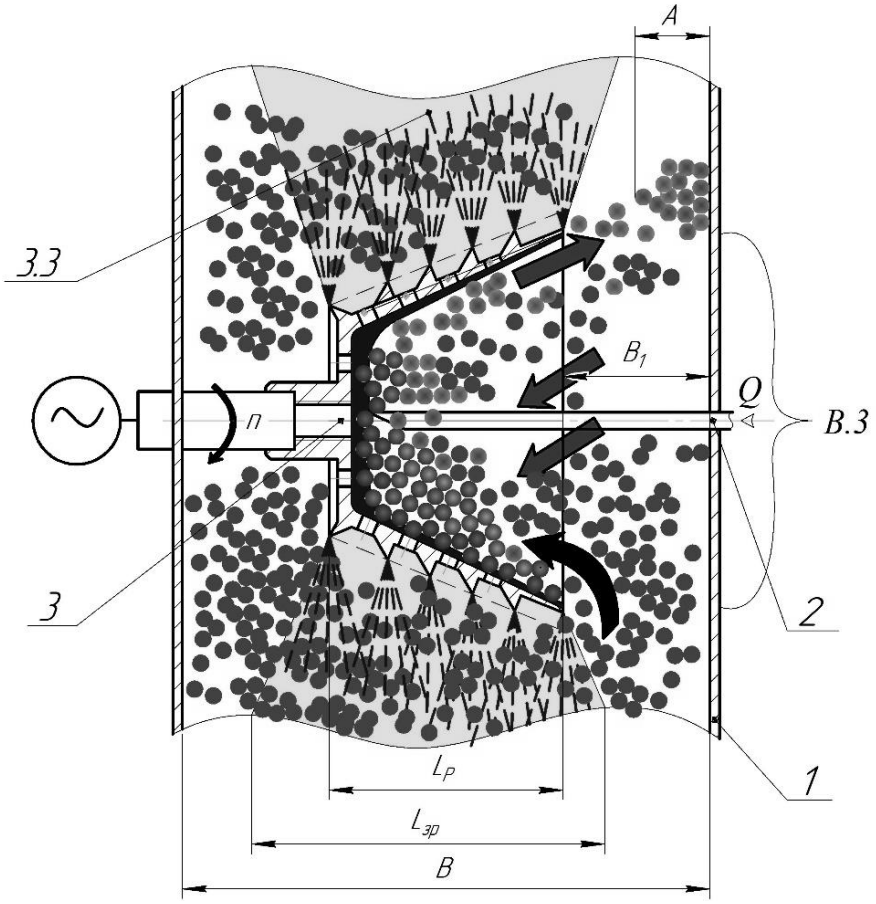


в)

а – конструкція, б – загальний вигляд, в – характер диспергування при робочих режимах n = 60 1/с; $\Gamma_v = 0{,}3\ \frac{кг}{м^2}$

Рис. 2 – Механічний дисперагтор конічного типу

Рідка фаза при подачі через трубку 2 розподіляються під дією відцентрової сили у вигляді плівки по внутрішній поверхні диспергатора, яка частково при потраплянні до отворів проходить на зовнішню поверхню диспергатора та розпилюється в зовнішню зону зрошення 3.3, рисунок 3. Диспергатор знаходиться в середині псевдозрідженого шару і тому зернистий матеріал заповнює частину диспергатора який обертається. При цьому гранули які безпосередньо контактують із внутрішньою поверхнею диспергатора частково поглинають рідку фазу і під дією відцентрової сили виводяться з чаші диспергатора в горизонтальному напряму.



1 – передня та задня стінка апарату, 2 – трубка подачі рідкої фази, 3 – механічний диспергатор, 3.3 – зовнішня зона зрошення механічного диспергатора, В3 – зона циркуляції зернистого матеріалу у внутрішній зоні диспергатора.

Рис. 3 – Схема руху зернистого матеріалу в зоні зрошення

В основу математичної моделі теплообмінну покладено рівняння авторів [5], яке доповнено витратами енергії на підігрів рідкої фази, що знаходиться на поверхні гранул у вигляді плівки, до температури кипіння та витрати на випаровування розчинника. Тоді рівняння теплового балансу для газового теплоносія записується у вигляді:

$$\varepsilon \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T_Г}{\partial t} + V_Г \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot \frac{\partial T_Г}{\partial x} = \varepsilon \cdot a \cdot \frac{\partial^2 T_Г}{\partial y^2} - \alpha \cdot F \cdot (T_Г - T_{p+n}) + G_p \cdot (1 - x_p) \cdot (r + C_n \cdot T_{p+n});$$

Для гранул:

$$(1-\varepsilon) \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T_{p+n}}{\partial t} - V_{p+n} \cdot (1-\varepsilon) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T_{p+n}}{\partial x} = \alpha \cdot F \cdot (T_Г - T_{p+n}) -$$
$$-G_p \cdot (1 - x_p) \cdot (r + C_n \cdot T_{p+n}) + G_p \cdot x_p \cdot q;$$

Відповідно до попередніх досліджень число Рейнольдса

$$Re = \frac{1{,}8 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3}}{27 \cdot 17 \cdot 10^{-6}} = 165 \div 200$$

$T_ш = 0{,}02 \cdot 10^{-3} = 20 \cdot 10^{-6}$ Па · с

$P_{95} = 1{,}29 \cdot \frac{273}{273+95} = 0{,}735$

$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{0{,}735} = 27{,}17 \cdot 10^{-6}$

Тоді розрахунок числа Нуссельта проводимо за наступною формулою, при $\frac{Re}{\varepsilon} > 200$

$$Nu = 0{,}4(\frac{Re}{\varepsilon})^{0{,}67} \cdot Pr^{0{,}33}$$

Результати розрахунку зміни температури шару наведені на рисунку 5.

Досліди проводились при зневодненні 40% (мас) розчину сульфату із вмістом гумінових речовин до 2% по відношенню до сухих речовин.

В якості початкових центрів грануляції використовувались кристали сульфату амонію з d_e = 1,5 мм. Температура теплоносія на вході становила 160 ºС, температура шару $T_ш$ = 95 ±2 ºС. Початкова висота шару зернистого матеріалу H_0 = 0,32 м. Вимірювання температур проводилось безінерційниим термопарами ХК з комп'ютерною системою із застосуванням програмного середовища Cobwile.

Керування процесу проводились за показниками термопари в характеристичній точці. X = 250, Y = 40, Z = 220 і підтримувались на рівні 95 ±2 ºС. Результати вимірювання зміни температури по висоті апарату по середній вертикальній площині при значенні Y = 55 наведено на рисунку 4.

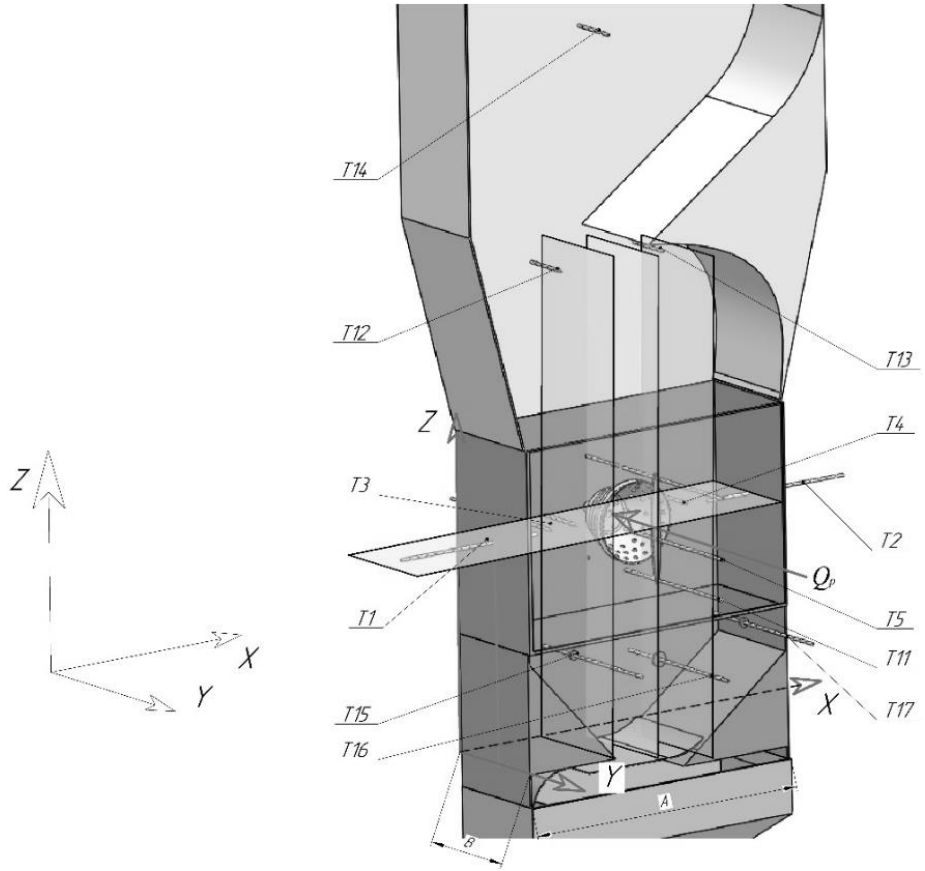


Рис. 4 – Схема розміщення термопар в камері гранулятора експериментальної установки

Координати точок виміру термопар наведенні в таблиці 1.

Таблиця 1 – Координати точок виміру термопар

Номер термопари	Координати		
	X	Y	Z
T1	0…110	55	220
T2	300…190	55	220
T3	100	0…110	220
T4	200	0…110	220
T5	150	110…0	210
T10	150	110…0	270
T11	150	110…0	170

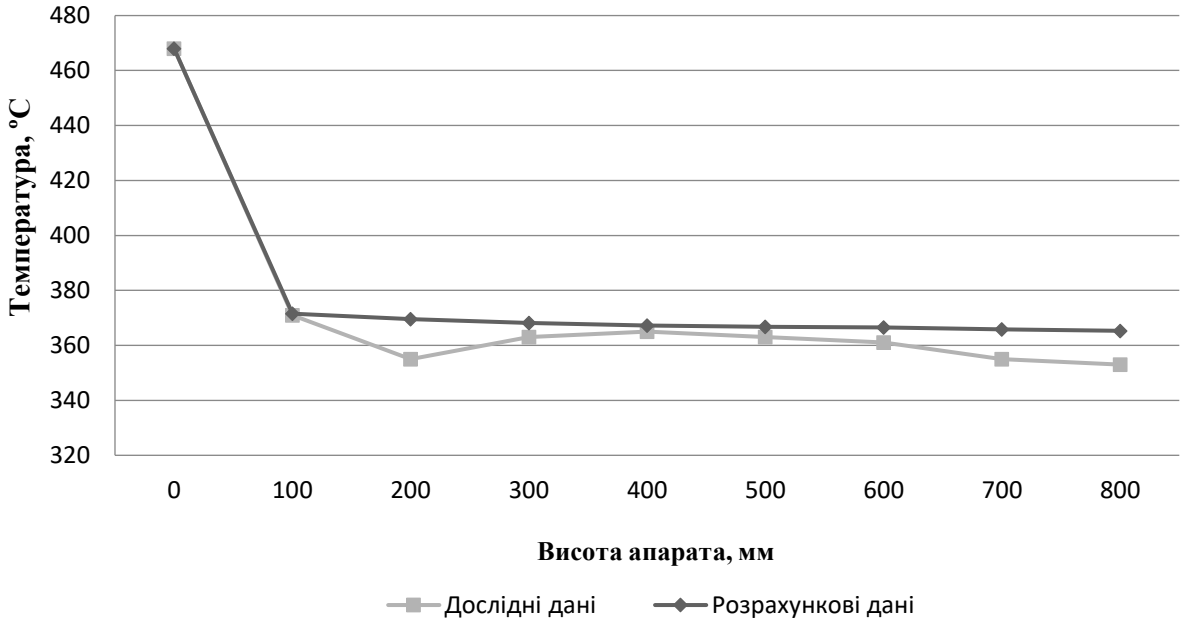


Рис. 5 – Зміна температури теплоносія по висоті апарата

Умовні позначення

ε – порозність шару частки газу
ρ_2 – густина газу, *кг/м*^{3}
$\rho_т$ – густина гранул, *кг/м*^{3}
$T_г$ – температура теплоносія, К;
$T_т$ – температура гранул, К;
$C_г$ – теплоємність газу, $\frac{\text{КДж}}{\text{кг·К}}$
$C_т$ – теплоємність гранул, $\frac{\text{КДж}}{\text{кг·К}}$;
$w_г$ - швидкість газу, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$;
$w_м$ - швидкість руху твердих частинок, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$;
α – коефіцієнт тепловіддачі від газу до поверхні гранул, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{·К}}$;
F – поверхня гранул в шарі на заданій висоті, м^2;
а – коефіцієнт температуропровідності,

Висновки. Застосування запропонованого механічного диспергатора для введення рідкої фази дозволило збільшити рівномірність розподілення і відповідно зменшити область зони з температурою дисперсії близькою до температури мокрого термометра. В результаті навіть при значення Re = 160÷180 коефіцієнт гранулоутворення ψ ≥ 88 %.

Список використаної літератури

1. *Asep Bayu Dani. M.* Progress in developing spray-drying methods for the production of controlled morphology particles: From the nanometer to submicrometer size ranges/ Asep Bayu Dani, Okuyama, Kikuo // Advanced Powder Technology. – 2011. – p. 1-19.
1. *Fries, L.*,DEM-CFD modeling of a fluidized bed spray granulator/ Fries, L.Antonyuk, S.Heinrich // Chemical Engineering Science. – 2011 – p. 2340-2355.
2. *КорнієнкоЯ.М.* Гідродинаміка струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження з направленою циркуляцією / Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай, А. М. Любека, С. О. Турко // Міжнародний науковий журнал. – 2016. – № 5 (2). – С. 101-106. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/ /UJRN/mnj_2016_5%282%29_30.
3. Технологии грануляции компании Glatt. – [Електронний ресурс]. – http://www.glatt.com.
Vinayak S. Sutkar., CFD–DEM model for coupled heat and mass transfer in a spout fluidized bed with liquid injection/ Vinayak S. Sutkar, Niels G. Deen, Amit V. Patil, Vitalij Salikov, Sergiy Antonyuk, Stefan Heinrich// Chemical Engineering Science. – 2016. – p. 185-197.

Надійшла до редакції 31.05.2018