

УДК 66.099.2

Скиданенко М. С., Склабінський В. І., Кононенко М. П.

**РОЗПОВСЮДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ТИСКУ У ЗОНІ ФОРМУВАННЯ
КРАПЕЛЬ ВІБРОГРАНУЛЯТОРА**

Сумський державний університет

У статті розглянуто результати теоретичних та експериментальних процесу досліджень нестационарного витікання струменя рідини з отвору, що є базовим для розрахунку віброгранулятора. Установлена закономірність регульованого розпаду струменів рідини на каплі та проведені дослідження, які підтверджують можливість створення грануляторів розплаву, для отримання продукту в вузькому фракційному діапазоні.

Ключові слова: гідродинаміка, віброгранулятор, розпад струменя, монодисперсність, математична модель, експериментальні дослідження, супутники, грануляційна вежа, вимушені збурення, регулярні імпульси.

В статье рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса нестационарного истечения струи жидкости из отверстия, что является базовым для расчета виброгранулятора. Установленная закономерность регулируемого распада струй жидкости на капли и проведенные исследований, которые подтверждают возможность создания грануляторов розплава, для получения продукта в узком фракционном диапазоне.

Ключевые слова: гидродинамика, виброгранулятор, распад струи, монодисперстность, математическая модель, экспериментальные исследования, спутники, грануляционная башня, вынужденные возмущения, регулярные импульсы .

В хімічній промисловості для отримання продукту з розплавів, наприклад у виробництві аміачної селітри, складних добрив типу NPK, до складу яких входять домішки, а також у виробництві гранул з пористою структурою та мікрогранул, найбільш поширений у використанні є обертовий віброгранулятор [1].

У більшості випадків обертовий віброгранулятор працює наступним чином (рис. 1). Розплав по патрубку подається в корпус. Електродвигун з розрахунковою частотою приводить в обертання порожнистий вал, на якому закріплені: розподільник, напірні лопаті, циліндричний корпус з перфорованим днищем. Під дією напору розплав витікає з усіх отворів перфорованого днища у вигляді струменів, які розпадаються на краплі.

Розпад струменів на краплі обумовлений статичною нестійкістю рідкого циліндра, який піддається дії сили поверхневого натягу та випадкових збурень, що накладаються на поверхню рідкого струменя. При краплеутворенні разом з основними краплями утворюється велика кількість значно менших за розміром крапель супутників [2]. Ці мікрокаплі є основним джерелом втрат цінних продуктів і шкідливих викидів аерозольних частинок у навколишнє середовище.

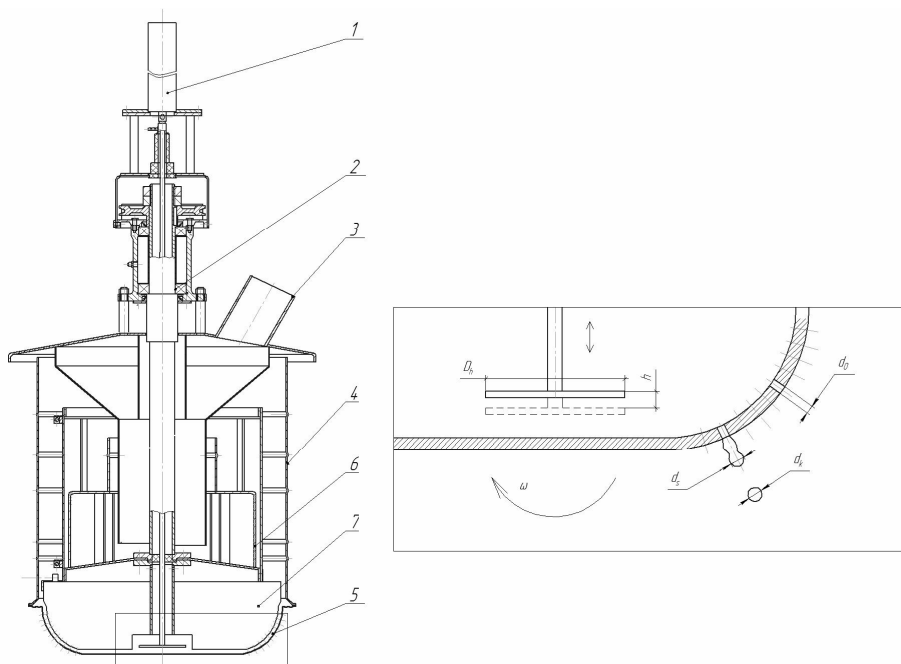
Зовсім іншою представляється картина розпаду струменя рідини на краплі, якщо початкові збурення на її поверхні обумовлені стороннім джерелом коливань постійної частоти. При накладенні регулярних збурень струмінь рідини розпадається на краплі однакового розміру без утворення крапель супутників, якщо довжина λ утворених хвиль буде більше πd (d - діаметр струменя) [2]. За таких умов відбувається зростання в часі амплітуди поверхневих хвиль, які виникають на поверхні струменя рідини.

Одним із способів отримання вимушених збурень струменя рідини є регулярна зміна імпульсів тиску в ньому. Як один із варіантів, джерелом таких імпульсів у обертовому віброгрануляторі може бути диск-випромінювач, на

який подається вібрація. Диск-випромінювач розташовують над центральною частиною внутрішньої поверхні перфорованого днища з зазором відносно неї (рис. 1). Зазор забезпечує надійний гідродинамічний зв'язок диска-випромінювача і центральної частини перфорованого днища. При накладенні вібрації диск-випромінювач здійснює зворотно-поступальний рух, за один хід якого переміщується G_h кількості рідини:

$$G_h = \rho_p V_h = \frac{\pi D_h^2}{4} h \rho_p, \quad (1)$$

де, ρ_p - густина розплаву; D_h - діаметр диска-випромінювача; h - відстань, яку проходить диск за один хід.



**Рис. 1. Обертовий віброгранулятор: 1- вібропристрій;
2 - підшипниковий вузол; 3- патрубок входу плаву; 4 - циліндричний корпус; 5 - перфороване днище (корзина); 6 - розподільник; 7 - напірні лопатки.**

Значення G_h є важливим критерієм ефективності передачі коливань на перфороване днище. Величина пульсації тиску, що виникла при цьому залежить від швидкості переміщення та амплітуди диску:

$$P = \frac{\rho_p v_h^2}{2} = \frac{\rho_p (h \cdot f)^2}{2}, \quad (2)$$

де, v_h - швидкість руху диску; f - частота коливання диску.

Хвилі коливань, які виникли за рахунок вібрації диска-випромінювача, поширюються у вигляді пружних деформацій у розплаві та передаються на перфороване днище. В результаті на струмені розплаву, які витікають з отворів, накладаються регулярні збурення у вигляді звужень та стовщень, що приводить до їх розпаду в місцях звужень на монодисперсні краплі [3].

Зі сказаного вище бачимо, що задаючись частотою коливань f , можемо впливати на закон зміни $P = f(\tau)$, та регулювати середній діаметр і діапазон монодисперстності одержуваних крапель розплаву при вимушеному розпаді струменя.

Для вирішення задачі, метою якої є з'ясування, як надалі відбувається розповсюдження коливань та змінюється значення тиску в струмені розплаву, що витікає з отвору перфорованого днища, можна скористатися рівняннями, що досить широко застосовуються для описання нестационарного витікання в'язкої рідини з отвору [4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_r}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) \right) \right], \\ \frac{\partial v_z}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right], \\ \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Розглянемо два можливих напрямки рішення цих рівнянь. Для зменшення кількості факторів від яких залежить гідродинамічний процес, доповнюємо систему рівнянь (3), кінематичними рівняннями визначення швидкості:

$$\frac{\partial r}{\partial \tau} = v_r, \quad (4)$$

$$\frac{\partial z}{\partial \tau} = v_z.$$

Підставивши рівняння (4) в систему рівнянь (3), що дозволяє значно їх спростити, зменшивши при цьому кількість змінних, виключивши похідну за часом, отримаємо наступну систему рівнянь :

$$\begin{cases} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0, \\ v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) \right) \right], \\ v_z \frac{\partial v_z}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right]. \end{cases} \quad (5)$$

Для вирішення системи рівнянь (5) застосовуємо сучасні методи рішення диференціальних рівнянь у частинних похідних і систем таких рівнянь. Використавши метод поділу змінних сумою [5], в результаті отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0, \\ v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + r \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} - \frac{v_r + r \frac{\partial v_r}{\partial r}}{r^2} \right], \\ v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right]. \end{cases} \quad (6)$$

Знайдене рішення має вигляд:

$$\begin{cases} p = -\frac{1}{2}\rho C_3^2 r^2 - \frac{1}{2}\frac{\rho C_2^2}{r^2} + C_9 - 2\rho C_3(C_3 z^2 - C_4 z - C_5 z) + C_8, \\ v_r = \frac{C_2}{r} + C_3 r, \\ v_z = C_5 + C_6 K + C_7 Y - 2C_3 z + C_4. \end{cases}, \quad (7)$$

де, $C_2, C_3 \dots C_9$ - константи рівнянь; K, Y - функції Бесселя першого і другого порядку відповідно.

Система рівнянь (7) незручна для застосування з точки зору невизначеності впливу зміни тиску в часі на величини радіальної і осьової складових швидкості, що не дозволяє передбачати ступінь впливу зміни тиску в результаті коливальних рухів рідини в перфорованій оболонці на зміну радіальної і осьової складової швидкості, та відповідно, його впливу на формування гідродинамічних умов в струмені, які призводять до його розпаду на краплі.

Наявність у рівнянні для визначення осьової складової швидкості функцій Бесселя так само істотно ускладнює отримання розрахункових залежностей, які можна було б використовувати для попереднього спрощеного аналізу гідродинаміки струменя рідини з виходом на конкретні інженерні рішення. З іншого боку, знайдене рішення дозволяє при формуванні відповідних граничних умов визначити константи рівняння і проводити аналіз гідродинаміки струменя в умовах стаціонарного її витікання. Такий аналіз також украй важливий, оскільки якість гранул, що одержують в грануляційній вежі, багато в чому залежить від якості роботи перфорованої оболонки у разі відсутності вимушеної вібрації.

З точки зору аналізу гідродинамічних параметрів струменя розплаву, при його витіканні з отворів перфорованої оболонки віброгранулятора, певний

інтерес представляє рішення системи рівнянь (1) для випадку нестационарного витікання, тобто з урахуванням змін, що відбуваються в часі, та визначається наявністю змінної τ .

Використовуючи для рішення системи рівнянь (3) метод розділення змінних сумою [5], отримаємо наступне рішення:

$$\begin{cases} P = C_{12} + \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + C_{11} + F(\tau), \\ v_r = \frac{C_2}{r} + C_3 r, \\ v_z = C_6 + C_7 \ln(r) + C_8 r^2 - 2C_3 z + C_5 + C_9 \tau + C_{10}. \end{cases}, \quad (8)$$

У першому рівнянні для визначення закону зміни тиску уздовж струменя входить функція $F(\tau)$, яка залежить від часу. Вид цієї функції можна визначити з граничних умов, вважаючи, що початок координат поєднано з центром отвору, з якого відбувається витікання розплаву. Тоді при $z = 0$:

$$P = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + P_1(\tau). \quad (9)$$

Припускаємо, що в отворі, з якого витікає рідина, тиск змінюється відповідно залежності:

$$P_1 = a \sin(b\tau + c) + d. \quad (10)$$

Таким чином, у загальному вигляді, величина зміни тиску вздовж вісі струменя "z" залежить від початкових та граничних умов витікання струменя з отвору, та фізичних властивостей рідини:

$$P = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + a \sin(b\tau + c) + d. \quad (11)$$

Наприклад, на рис. 2, показано, як змінюється величина тиску уздовж струменя до його розпаду на краплі, у разі витікання рідини (води) з отвору, при досягненні початкової амплітуди коливань зі значенням $\delta = 100$ мкм у перетині отвору. Аналіз отриманих результатів (рис.2) показує, що по досягненні довжини струменя $l_c = 0,00145$ м (до розпаду на краплі) абсолютна

величина коливань зменшується на 0,012%. Це дає змогу передбачити вплив коливань на струмінь та формування крапель рідини (розплаву).

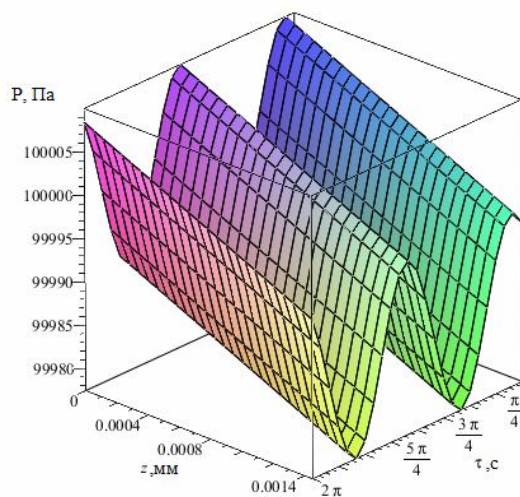


Рис. 2. Зміна тиску вздовж струменя з часом

Дослідження гідродинамічних параметрів процесу витікання рідини з герметичного, вертикально розташованого циліндричного резервуара, постійного поперечного перетину, проводились через регульовані по діаметру отвори на дні й бічній поверхні. В якості рідини використовувалась вода та модельна рідина, яка мала щільність, в'язкість та коефіцієнт поверхневого натягу близькі до аналогічних показників розплаву азотного добрива. Дослідження витікання рідини проводилися на одиночному отворі у тонкій стінці. Швидкість витікання рідини з отвору регулювалася шляхом зміни висоти розташування напірної ємності перед герметичним циліндричним резервуаром з отвором. Підтримання постійного рівня рідини в напірній ємності досягалося завдяки наявності системи переливу. В ході проведення дослідів змінними параметрами були напір модельної рідини перед отвором та його діаметр, склад модельної рідини і кут до горизонту, під яким вона витікає з циліндричного резервуару. Параметром, який визначався, була довжина суцільної частини струменя рідини. Результати досліджень приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 Залежність довжини суцільної частини струменю від напору та діаметру отвору

№ п/п	Діаметр отвору, мм	Довжина суцільної частини при напорі, (мм)					
		2500	2000	1500	1000	500	250
1	2,0	142	128	120	115	98	130
2	1,8	152	140	164	155	160	220
3	1,2	120	150	175	180	180	150

В ході проведення дослідів, по вивченню гідродинамічних характеристик процесу витікання рідини з отвору, було виявлено залежність довжини суцільної частини струменя від діаметру отвору та швидкості витікання (напору) рідини. При цьому було відмічено, що довжина суцільної частини струменя рідини для діаметрів отворів 1,2мм при напорах від 250мм до 500мм мала тенденцію до збільшення, при напорах від 500мм до 2500мм мала тенденцію до зменшення, при цьому, при напорах від 2000мм до 2500мм довжина суцільної частини струменя рідини була менше, ніж при напорах в інтервалі 250мм - 500мм. Для отворів діаметром 2,0мм довжина суцільної частини струменя рідини при напорах від 250мм до 500мм мала тенденцію до різкого зменшення, при напорах від 500мм до 2500мм мала тенденцію до збільшення, при цьому, при напорах від 500мм до 2000мм довжина суцільної частини струменя рідини була менше, ніж при напорі 250мм.

Аналогічні досліди були проведені при накладені імпульсів тиску на рідину. В якості генератора коливань був застосований електромагнітний вібратор, який давав можливість регулювати амплітуду, потужність та частоту коливань. Амплітуда коливань змінювалась в діапазоні 0,05...0,125мм, потужність – 5...100 Вт, частота – 100...1000 Гц з кроком 0,1-1,0 Гц.

Дослідженнями було встановлено, що при регулярному розпаді струменя рідини, можуть бути отримані рівномірні краплі як без супутників, так і з ними.

Істотним фактором виявилися частота, потужність та амплітуда коливань. При питомій потужності випромінювача імпульсів до 20 Вт та амплітуді коливань 0,05-0,025 мм в об'ємі рідини на струмені утворюються ледь помітні початкові перетяжки, які потім звужувались майже при повному збереженні симетрії. При цьому в місцях перетяжок утворюються мікрокраплі - супутники. Розмір супутників збільшувався зі зменшенням частоти початкових збурень.

При збільшенні питомої потужності випромінювача імпульсів від 20 до 100 Вт конфігурація початкових перетяжок міняється. Вони набувають асиметричну форму щодо площини, перпендикулярної осі струменя. Краплі в момент розпаду струменя мають грушоподібну форму, звернену гострим кінцем до отвору витікання. Після розпаду струменя, загострений кінець грушоподібної краплі втягується до неї за рахунок сили поверхневого натягу рідини. Відсутність супутників при грушоподібній формі розриву струменя рідини на краплі можна пояснити близькістю місця утворення супутника від основної краплі. Утворення грушоподібної форми краплі в момент її відриву від струменя обумовлено різницею швидкостей рідини усередині струменя та краплі, внаслідок періодичної зміни швидкості витікання рідини з отвору.

Наявність сторонніх коливань - через роботу іншого обладнання, неякісне кріплення штока вібратора або з інших причин - сприяє утворенню супутників. Майже регулярно утворюються супутники при природному (спонтанному) розпаді струменів рідини на краплі. При спостереженні були відзначені різні варіанти руху супутників та його залежність від фізичних властивостей рідини, що витікає з отвору. Найбільш легко управляти цим процесом при накладенні регулярних збурень на поверхню струменя за рахунок періодичної зміни тиску перед отвором витікання при коливаннях мембрани.

Результати досліджень, що отримані при накладенні імпульсів тиску на рідину, яка витікає з отвору, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 Залежність довжини суцільної частини струменя рідини від напору, діаметру отвору та частоти вібрації

№ п/п	Діаметр отвору, мм	Частота вібрації, Гц	Довжина суцільної частини при напорі, (мм)		
			100	200	250
1	1,2	0	55	103	148
2	1,2	360	12	14	17
3	1,3	0	62	107	152
4	1,3	360	14	16	19

Фотографії різних режимів розпаду струменя на краплі наведені на рис.4 .

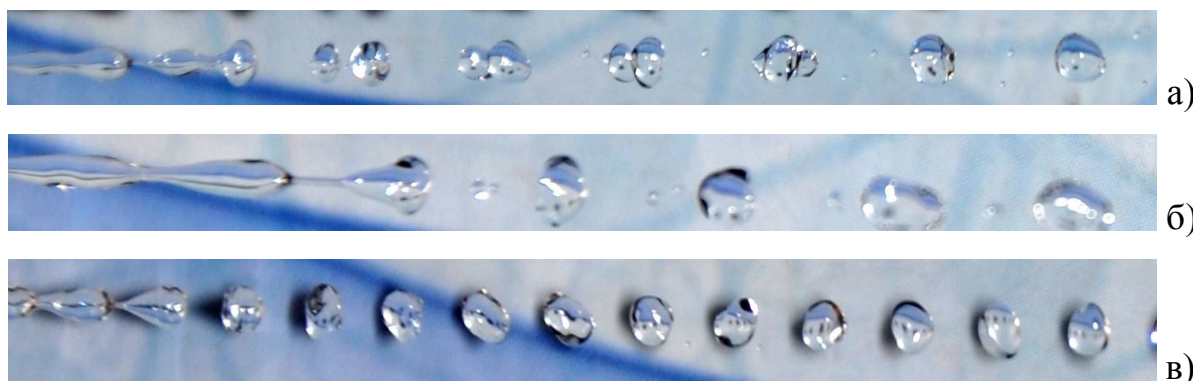


Рис. 4. Режими розпаду струменя на краплі: а) об'єднання краплі з супутником; б) утворення капель - супутників при недостатній потужності вимушених імпульсів; в) рівномірні краплі без утворення супутників при вимушеному розпаді струменя

Отримані, підчас дослідження, результати підтверджують приведеними вище теоретичні вишукування. Встановлені закономірності регульованого розпаду струменів рідини на краплі були апробовані при розробці обертового вібраційного гранулятора розплаву аміачної селітри. Отримання показників, що до гранулометричного складу продукту проводились на агрегаті виробництва

аміачної селітри АС-60. В ході проведення випробувань обертовий вібраційний гранулятор забезпечив отримання продукції наступного гранулометричного складу: фракція гранул менше 1,0мм – 0,02-0,2%, фракція гранул 2,0-4,0мм понад 96%, при цьому частка гранул фракції 2,0-2,5мм – не менше 88%, розмір гранул основної фракції - 2,1-2,5мм.

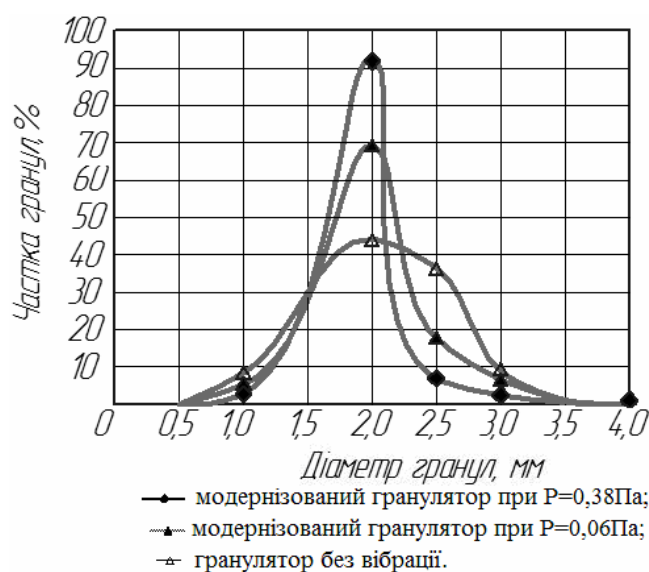


Рис. 5. Фракційний склад гранул аміачної селітри

Окрім цього, при зміні частоти вібрації гранулятор забезпечив отримання продукції з розміром основної фракції гранул 2,5-3,0мм понад 65%. Характеристики продукту, який був отриманий на обертовому вібраційному грануляторі, приведені на рис. 5.

Установлена закономірність регульованого розпаду струменів рідини на каплі та проведені дослідження підтверджують можливість створення грануляторів розплаву азотних добрив, які дадуть можливість отримувати гранули в вузькому фракційному діапазоні, при максимальній кількості частинок, розмір яких може охолотитись в цій башті; забезпечити можливість регулювати розмір крапель в залежності від температури повітря. В результаті цього, теплове навантаження на вежу буде близьким до оптимального, що дозволить зменшити налипання частинок на робочих поверхнях башти, і, як

результат, скоротити витрати енергоносіїв на повторну переробку некондиційного продукту та з викидами пилу азотних добрив в атмосферу, а також покращити екологічну ситуацію в районі виробництва.

Литература:

1. Аммиачная селитра: свойства, производство, применение [Текст] / А.К. Чернышев, Б.В.Левин, А.В. Туголуков, и др.; под ред. Чернишева А.К., Туголукова А.В. – М., 2009. – 544с.
2. Холин, Б. Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости [Текст] / Б. Г. Холин // М., "Машиностроение". – 1977. - 182 с.
3. Обертовий гранулятор розплавів [Текст]: Патент на корисну модель №68829 Україна МПК В01 J2/02. / Склабінський В.І., Артюхов А.Є., Скиданенко М.С., Покотило В.М., Іваній А.В., ; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №u201112007; заявл. 12.10.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. №7. – 4 с.
4. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика, [Текст] / В. Г. Левич – 2 изд., М., 1959. – с. 705.
5. Shingareva, I., Solving nonlinear partial differential equations with Maple and Mathematica [Текст] / I. Shingareva, C. Lizarraga-Celaya. – Springer Wien New York, – 2011. – 359 p.

Скиданенко, М.С. Розповсюдження коливань тиску у зоні формування крапель віброгранулятора [Текст]/ М.С. Скиданенко, В.І Склабінський, М.П. Конененко // Сборник научных трудов Sworld. - Выпуск 2. Том 11. - Одесса: КУПРИЕНКО, 2013 - с. 28-36.