

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**СКИДАНЕНКО Максим Сергійович**

УДК [66.099.2+66.063.62].02:66.021.1(043.3)

**ГІДРОМЕХАНІЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ  
МОНОДИСПЕРСНИХ КРАПЕЛЬ ТА ГРАНУЛ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Склабінський Всеволод Іванович**,  
Сумський державний університет,  
завідувач кафедри процесів та обладнання хімічних  
і нафтопереробних виробництв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Атаманюк Володимир Михайлович**,  
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів,  
завідувач кафедри хімічної інженерії;

доктор технічних наук, професор  
**Якуба Олександр Родіонович**,  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми,  
професор кафедри інженерних технологій харчових  
виробництв.

Захист відбудеться «26» грудня 2014 року об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.04 у Сумському державному університеті (40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, ауд. Ц-204).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету (40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2).

Автореферат розісланий «    » листопада 2014 року.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради К 55.051.04  
кандидат технічних наук, доцент

Л. Л. Гурець

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останніми роками все більш інтенсивного розвитку набувають наукові дослідження та практичні розробки, пов'язані з одержанням і використанням речовин, що мають переважно монодисперсний склад (краплі та гранули). Продукцію однакового складу використовують у різних сферах: ядерній технології, медицині, харчовій промисловості, хімічній, машинобудівній промисловості та ін. Широкий діапазон застосування монодисперсних частинок передбачає розбіжність параметрів, що, у свою чергу, обумовлює велику різноманітність методів їх отримання.

Ці методи повинні забезпечити найменші втрати вихідного продукту і звести до мінімуму утворення браку кінцевого продукту, автоматизацію не лише окремих етапів технологій, а й комплексну роботизацію технологічного процесу, включаючи процеси обліку та контролю на всіх його стадіях. Крім того, найважливішими критеріями є ресурсозбереження (включаючи енерго- та матеріалоемність); екологічна безпека; оптимізація складових людської праці; наступність технологій, їх швидке суміщення з уже існуючими або можливість заміни ними вже освоєних.

У сучасному хімічному виробництві застосування монодисперсних частинок реалізовано, зокрема, у великотоннажних виробництвах азотних і комплексних мінеральних добрив, що одержуються баштовим способом (прилювання). Для формування краплинних структур застосовують різні типи технічних пристроїв. На сьогодні найбільш перспективним є метод вимушеного розпаду струменів рідини, що відповідає переліченим вимогам, із використанням обертових або статичних вібраційних грануляторів у баштах прилювання.

У сучасному сільському господарстві у всьому світі динамічно зростає попит на азотні добрива. Найближчими роками очікуються активне інвестування та зростання світових потужностей виробництва мінеральних добрив. На стадії будівництва на цей час знаходяться 250 проектів. Експерти IFA оцінюють, що у 2015–2020 роках споживання азотних добрив у середньому зросте на 2,5–3% за 1 рік і досягне 215 млн. т поживних речовин.

Зі зростанням попиту на мінеральні азотні добрива та виникненням конкуренції на ринку збуту актуальною є необхідність підвищення якості отриманого продукту. Існуючі підприємства прагнуть збільшити виробництво азотних добрив без будівництва нових башт прилювання, це можливо досягти лише шляхом модернізації вузла грануляції. У зв'язку з цим перед науковцями та інженерами постає актуальна проблема модернізації існуючого обладнання для диспергування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота відповідає тематичному плану науково-дослідних робіт кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв (ПОХНВ) Сумського державного університету в рамках держбюджетної тематики «Дослідження гідродинамічних та масотеплообмінних характеристик пристроїв з вихровим та високотурбулізованими одно- та двофазними потоками» (номер державної реєстрації 0110U002632). Термін виконання – 2010 – 2014 р. Замовник – Міністерство освіти і науки України. Результати дисертаційної

роботи також були впроваджені при виконанні господарських розрахункових договорів на виготовлення обертових вібраційних грануляторів. В якості замовника виступали – ПАТ «Концерн Стирол» Ostchem та ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання азот».

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є дослідження основних закономірностей гідродинаміки витікання струменя рідини з тонкостінного отвору та динаміки розвитку збурень на поверхні струменя рідини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити гідродинаміку руху рідини в порожнистій перфорованій оболонці з малим значенням  $Re$ , що дасть можливість характеризувати розподіл швидкості руху розплаву в порожнині оболонки (в кошику обертового вібраційного гранулятора) і перед отворами витікання, та узагальнити отримані результати у вигляді рекомендацій з модернізації конструкції гранулятора залежно від робочих параметрів.

2. Дослідити гідродинаміку струменя, що витікає з тонкостінної перфорованої оболонки, при мимовільному розпаді. Подати узагальнення отриманих результатів у вигляді аналітичних рівнянь.

3. Установити гідродинамічні закономірності струменя, що витікає з отвору, при накладанні на нього вимушених коливань. Подати узагальнення отриманих результатів у вигляді аналітичних рівнянь.

4. Провести експериментальні дослідження для вивчення режимів розпаду струменя.

5. На основі експериментальних і теоретичних досліджень модернізувати існуючий обертовий вібраційний гранулятор.

6. Запропонувати оптимальний режим роботи генератора низьких частот для забезпечення монодисперсного складу продукту та зниження кількості пилу.

7. Підтвердити запропоновані рекомендації на промислових випробуваннях.

*Об'єкт дослідження* – процес диспергування рідини методом вимушеного розпаду струменя.

*Предмет дослідження* – вплив гідромеханічних показників пристроїв на процес диспергування рідини за допомогою вібраційного гранулятора для отримання монодисперсних крапель та гранул.

**Методи дослідження.** У роботі були використані методи фізичного та математичного моделювання процесу диспергування струменів за різних умов. Гідродинаміку порожнистої перфорованої оболонки обертового вібраційного гранулятора досліджували чисельним способом за допомогою програмного забезпечення ANSYS CFX. Для розв'язання диференціальних рівнянь використовували аналітичні методи. Проведено експериментальне дослідження режимних параметрів роботи обертового вібраційного гранулятора. Опрацювання експериментальних даних виконували за допомогою комп'ютерної техніки та пакета прикладних програм, а саме: MS Office Excel, MATLAB (Matrix Laboratory), MathCAD.

**Наукова новизна одержаних результатів.** За результатами теоретичних та експериментальних досліджень процесу диспергування струменів у обертовому вібраційному грануляторі в дисертаційній роботі вперше отримано:

- аналітичний розв'язок рівнянь, які описують витікання струменя з оболонки обертового вібраційного гранулятора у стаціонарному режимі з подальшою зміною радіальної складової швидкості рідини струменя, що впливає на формування величини крапель;

- аналітичні рівняння, які описують витікання струменя з оболонки обертового вібраційного гранулятора під дією коливань тиску, що дозволяє проводити теоретичний аналіз впливу початкових і граничних умов із використанням вібраційних впливів на параметри струменя та утворювальних крапель;

- експериментально досліджено вплив параметрів сигналу генератора низьких частот на режими розпаду струменя з урахуванням рівня рідини у кошику вібраційного гранулятора та швидкості його обертання.

Набув подальшого розвитку опис гідродинаміки:

- руху рідини в порожнистій перфорованій оболонці обертового віброгранулятора;

- витікання струменя з отворів обертового вібраційного гранулятора за умов вільного витікання і при накладанні вимушених коливань.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані аналітичні рівняння опису гідродинаміки витікання струменя дають можливість аналізувати процес диспергування струменя, що дає змогу встановлювати оптимальні технологічні параметри процесу диспергування розплаву азотних добрив для отримання якісного продукту. Встановлені математичні закономірності дозволяють уточнити методику розрахунку грануляторів розплаву азотних добрив, що дає можливість отримувати гранули у вузькому фракційному діапазоні при максимальному розмірі гранул, які можуть охолотитися у башті прилювання. На підставі рівнянь гідродинаміки запропоновано математичну модель, яка враховує поширення коливань тиску вздовж струменя, що дозволяє проаналізувати режим вимушеного розпаду струменя. Розроблено методику розрахунку диспергатора – обертового вібраційного гранулятора, що дозволяє проводити теоретичний аналіз пристрою за різних умов експлуатації гранулятора, в тому числі й для розплаву азотних мінеральних добрив. Науково-технічні результати дисертаційної роботи були впроваджені при розрахунку диспергатора обертового вібраційного гранулятора для гранулювання аміачної селітри.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи, що складають її сутність, отримані особисто здобувачем. Серед них: статистичний збір матеріалу, його обробка, аналіз роботи конструкцій приладів для диспергування рідин; створення лабораторної установки та проведення експериментальних досліджень; розроблення фізичної та математичної моделей досліджуваного процесу. Вибір теми дисертаційної роботи, постановка завдання дослідження, обговорення отриманих результатів відбувалися разом із науковим керівником – проф. Склабінським Всеволодом Івановичем.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної

роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій: «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2011, 2013 рр.); II та III Всеукраїнських міжвузівських науково-технічних конференціях «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2012, 2014 рр.); Всеукраїнській науковій конференції з міжнародною участю «Інженерні засоби і методи оптимізації хімічних виробництв» (м. Дніпропетровськ, 2011 р.); II Міжнародній конференції молодих вчених «ССТ-2011» (м. Львів, 2011 р.); на II Міжнародній Казахстансько-Російській конференції з хімії та хімічної технології (м. Караганда, Казахстан, 2012 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «КМХТ – 2012» (Київ–Рубіжне, 2012 р.); I Міжнародній науково-технічній конференції «Хімічна технологія: наука та виробництво» (м. Шостка, 2012 р.); Міжнародній українсько-японській конференції з питань науково-промислового співробітництва (м. Одеса, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте» (м. Одеса, 2013 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 17 наукових працях, серед них 4 статті у наукових фахових виданнях та 2 статті в журналах, що входять до наукометричних баз даних, 11 тез доповідей на наукових конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (який містить 100 найменувань на 10 сторінках) і додатків. Робота викладена на 110 сторінках основного тексту, містить 40 рисунків, 12 таблиць та додатків на 7 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

**У вступі** обґрунтовано актуальність досліджень щодо вдосконалення процесів та обладнання для отримання монодисперсних крапель (гранул) методом вимушеного розпаду струменя, визначено зв'язок із науковими планами й темами, сформульовано мету та завдання досліджень, зазначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, відомості щодо апробації результатів.

**У першому розділі** зроблено огляд літератури з аналізом конструкцій обертового вібраційного гранулятора, зазначено переваги даного обладнання, розглянуто вплив гідродинамічних та механічних чинників на формування крапель. Наведені результати показують складність процесів, які проходять під час диспергування рідини, і підтверджують необхідність застосування результатів експериментальних досліджень для точного опису закономірностей гідродинаміки струменя до його розпаду. Зазначено основні проблеми і недоліки конструкцій грануляторів та умов їх роботи, на підставі чого сформульовано основні завдання теоретичних та експериментальних досліджень.

**У другому розділі** обґрунтовано фізичну модель витікання струменя рідини з отвору з тонкою стінкою і розпад її на краплі, яка дозволяє оцінити

вплив гідро- механічних параметрів роботи апарата на характер поширення збурень на поверхні струменя. Розроблено математичну модель процесу диспергування рідини.

Конструкцію вібраційного диспергатора яку було модернізовано подано на рис. 1. Електродвигун (не показано) з розрахунковою частотою надає обертання порожньому валу, водночас обертається розподільник із напірними лопатями, циліндрична камера з перфорованим днищем (кошиком) та напірними лопатями, розміщеними в перфорованому днищі. Розплав по патрубку для введення подають у кільцевий колектор. При взаємодії з напірними лопатями розплав рівномірно проходить через отвори перфорованого циліндра і сітку. Далі розплав надходить у перфороване днище. Під дією напору розплав витікає з усіх отворів перфорованого днища у вигляді струменів. Водночас із подачею розплаву вмикається вібропристрій (актуатор), на який із генератора низьких частот подається певний сигнал, що є джерелом вібрації. Через шток вібрація з певною частотою подається на диск-випромінювач, розміщений над центральною частиною внутрішньої поверхні перфорованого днища. При накладанні вібрації диск-випромінювач здійснює зворотно-поступальний рух. У результаті на струмені розплаву, що витікають з отворів, накладаються регулярні збурення.

Для створення математичної моделі опису процесу диспергування рідини з накладанням вимушених коливань на неї необхідно було розглянути особливості витікання струменя рідини з отвору тонкої стінки і розпад її на краплі без накладання вібрації для дослідження загальних особливостей розпаду рідких струменів.

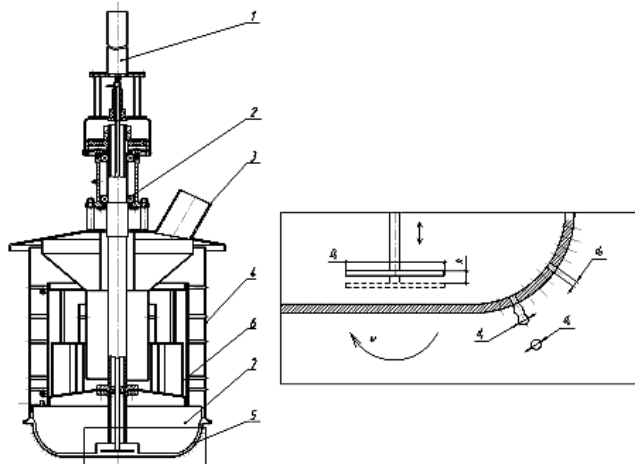
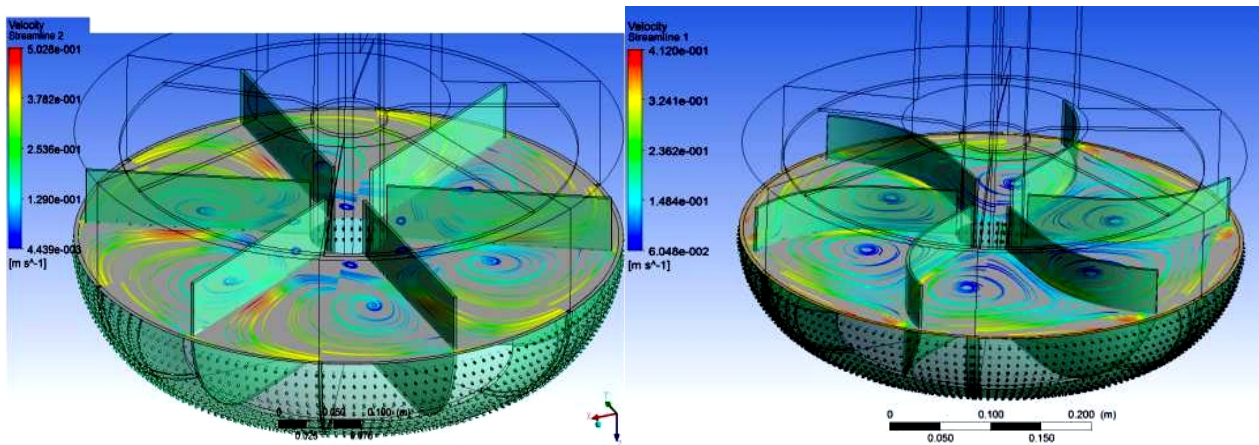


Рис. 1. Обертовий віброгранулятор: 1 – вібропристрій (актуатор); 2 – підшипниковий вузол; 3 – патрубок входу плаву; 4 – циліндричний корпус; 5 – перфороване днище (кошик); 6 - розподільник; 7 - напірні лопаті

Для дослідження гідродинаміки руху рідини в порожнистій перфорованій оболонці скористалися чисельним методом за допомогою програмної системи ANSYS CFX (<http://www.ansys.ru/>), що дозволило отримати характер розподілу швидкості її руху в робочій порожнині гранулятора і перед отвором витікання. На першому етапі було досліджено вплив кількості радіальних лопатей (без лопатей і від 4 до 7) на гідродинаміку руху рідини в порожнистій перфорованій оболонці.

Наступним етапом досліджувалася швидкість витікання рідини з отворів залежно від геометричної форми лопатей. Аналіз проводили на радіальних (вихідний кут лопатей  $90^\circ$ ) (рис. 2 а) і загнутих уперед (вихідний кут лопатей  $135^\circ$ ) лопатях (рис. 2 б) при цьому вони повторювали форму перфорованого днища. Усі випробування проводилися в однакових умовах.

Чисельне дослідження дозволило уточнити (відкоригувати) розрахунок швидкості витікання струменя розплаву та знайти спосіб підвищення швидкості витікання (напору) розплаву з отворів тороїдального днища гранулятора.



а)

б)

Рис. 2. Траєкторії руху рідини обертового гранулятора зі швидкістю обертання днища  $0,83 \text{ c}^{-1}$ : а) із 6 радіальними лопатями; б) з 6 загнутими вперед ( $\beta_2 = 135^\circ$ ) лопатями

Для розроблення математичної моделі гідродинамічних характеристик струменя, що витікає з отвору з вільною поверхнею, використовували методику, що ґрунтується на рівняннях руху в'язкої рідини. Для спрощення та зручності розв'язання рівняння Нав'є – Стокса, яким описуємо рух рідини (витікання струменя з отвору), використовували рівняння в циліндричній системі координат. Для вирішення поставленого завдання розглядали збурення струменя в умовах, за яких можна вважати, що течія є вісесиметричною, і тангенціальна складова швидкості  $v_\theta = 0$  та  $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$ . При симетричних хвилях переріз струменя залишається коловим, відбуваються лише звуження та розширення (рис. 3).

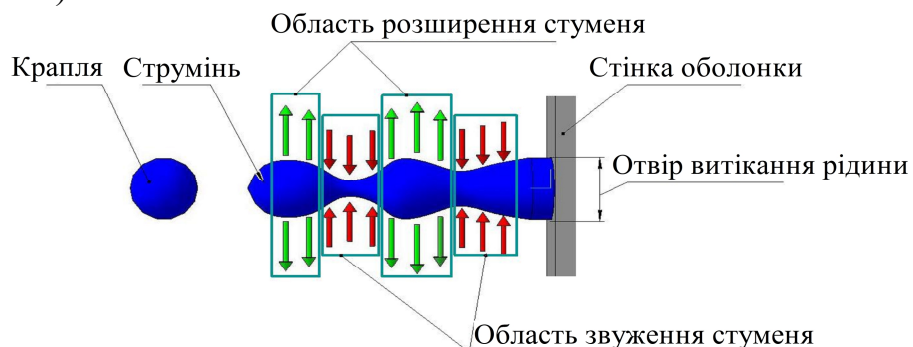


Рис. 3. Вісесиметрична форма розпаду струменя



Для симетричних хвиль рівняння руху рідини в струмені (для стаціонарного режиму) в циліндричній системі координат мають вигляд:

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) \right) \right], \quad (1)$$

$$v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0. \quad (3)$$

Припускали, що осьова складова швидкості  $v_z$  у момент витікання змінюється згідно з параболічним законом, що має вигляд

$$v_z = A_1 r^2 z^2 + A_2 r + A_3. \quad (4)$$

Для знаходження залежності зміни  $p(z)$  уздовж осі струменя припускали, що зміна тиску в струмені у радіальному напрямку незначна і що при  $z = 0$  початок системи координат збігається з початком витікання струменя під сталим тиском  $p = const$ . Тоді отримуємо розв'язок

$$p(z) = -\frac{1}{r} \left( \rho \left( \frac{1}{2} A_1^2 r^5 z^4 + A_1 r^4 z^2 A_2 + A_1 r^3 z^2 A_3 - 2\nu A_1 r^3 z - \frac{4}{3} \nu A_1 r z^3 - \nu A_2 z \right) \right) + p_1. \quad (5)$$

Для чисельного аналізу отриманих розв'язків  $v_r$  та  $v_z$  визначали коефіцієнти  $A_1$ ,  $A_2$  і  $A_3$ , значення яких знаходили таким чином. Припускали, що на поверхні струменя  $r = r_s$  тиск  $p$  дорівнює тиску навколишнього середовища  $p_0$ .

Граничні умови дали можливість визначити один із шуканих коефіцієнтів  $A_2$ , що матиме вигляд

$$A_2 = -\frac{1}{6} \frac{(r_s (3z^4 A_1^2 \rho \cdot r_s^4 + 6z^2 A_1 \rho \cdot r_s^2 A_3 - 12z A_1 \rho \nu r_s^2 - 8\rho \nu A_1 z^3 - 6p_1 + 6p_0))}{\rho z (A_1 r_s^4 z - \nu)}. \quad (6)$$

Для визначення наступного коефіцієнта  $A_3$  припускали, що на осі струменя, тобто при  $r = 0$ , радіальна складова швидкості також дорівнює нулю:  $v_r = 0$ . Врахувавши перелічені вище умови значення коефіцієнта  $A_3$  матиме такий запис:

$$A_3 = -\frac{1}{6} \frac{3z^4 A_1^2 \rho r_s^4 + 6p_0 - 12z A_1 \rho \nu r_s^2 - 8\rho \nu A_1 z^3 - 6p_1}{z^2 r_s^2 \rho A_1}. \quad (7)$$

Використавши припущення, що у точці, близькій до початку системи координат  $z = z_0$ , швидкість витікання ще не змінює свого значення і дорівнює швидкості течії струменя в отворі  $v_z = v_{z_0}$ , отримали рівняння коефіцієнта  $A_1$ :

$$A_1 = \frac{1}{3} \frac{1}{z_0^3 r_s^2 \rho (2r^2 - r_s^2)} (-4\nu \rho z_0^2 + 3v_{z_0} r_s^2 \rho z_0 - 6\rho \nu r_s^2 + (16\nu^2 \rho^2 z_0^4 -$$

$$-24v\rho^2 z_0^3 v_{z0} r_s^2 + 48v^2 \rho^2 z_0^2 r_s^2 + 9v_{z0}^2 r_s^4 \rho^2 z_0^2 - 36v_{z0} r_s^4 \rho^2 z_0 v + 36\rho^2 v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r_s^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r_s^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r_s^2 r_s^2 \rho p_1 - 18z_0^2 r_s^4 \rho p_0 + 18z_0^2 r_s^4 \rho p_1)^{1/2}. \quad (8)$$

Знайшовши значення всіх коефіцієнтів, можемо записати загальний вигляд залежностей радіальної та осьової складових швидкості витікання струменя:

$$v_z = f_1(v_{z0}, \rho, z_0, r_s, P_0, z, v, r, P_1), \quad (9)$$

$$v_r = f_2(v_{z0}, \rho, z_0, r_s, P_0, z, v, r, P_1). \quad (10)$$

Отримані рівняння дозволяють проводити теоретичний аналіз впливу фізичних властивостей рідини, діаметра отвору на зміну довжини струменя, що формує об'єм краплі, та швидкості течії струменя вздовж осі до його розпаду на краплі.

На рис. 4 зображена залежність радіальної складової швидкості  $v_r$ , розрахована для різних початкових швидкостей витікання струменя з отвору за залежністю (10).

Під час витікання струменя з отвору на деякій відстані від отвору витікання рідини радіальна складова швидкості майже не виникає. Зі збільшенням відстані від отвору на струмені з'являються і розвиваються збурення, які приводять до збільшення радіальної швидкості, що, у свою чергу, може призвести до розпаду струменів на краплі.

Отриманий графік (рис. 4) у ході розв'язання характеризує кількісну зміну радіальної складової швидкості  $v_r$  уздовж осі  $z$  від моменту витікання струменя до його розпаду на краплі. З графіка (рис. 4) бачимо, що зростання початкової швидкості витікання рідини з отвору в процесі диспергування призводить до зменшення відстані від отвору, на якій радіальна складова набуде критичного значення, при якому відбувається розпад струменя. Чим менша відстань від отвору витікання під час розпаду струменя, тим менша

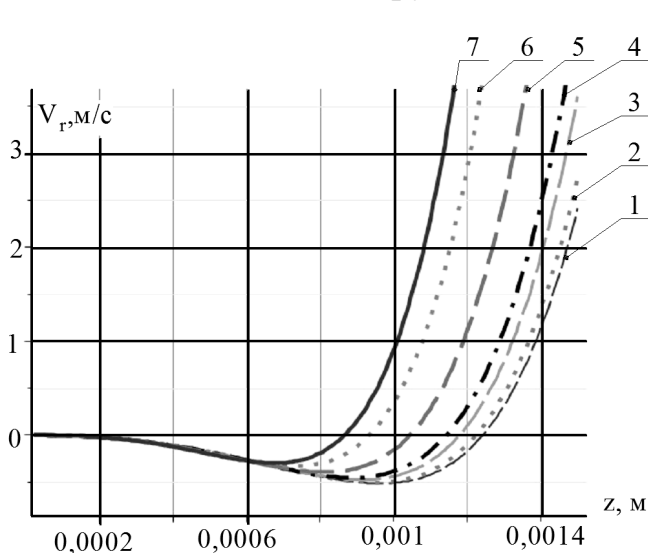


Рис. 4. Залежність зміни радіальної складової швидкості  $v_r$  вздовж осі  $z$  при  $V_{z0}$ : 1) 0,3 м/с; 2) 0,8 м/с; 3) 2 м/с; 4) 3 м/с; 5) 6 м/с; 6) 10 м/с; 7) 13 м/с.

довжина частини струменя, що формує об'єм утвореної краплі під час розпаду струменя. Ця гіпотеза підтверджується експериментальними дослідженнями, а також збігається з результатами досліджень інших науковців.

Зовсім іншою є картина розпаду струменя рідини на краплі, якщо початкові збурення на її поверхні обумовлені стороннім джерелом коливань сталої частоти. Для розв'язання задачі, метою якої є з'ясування, як надалі відбувається поширення коливань та змінюється значення тиску в струмені розплаву, що витікає з отвору перфорованого

днища, було використано рівняння Нав'є – Стокса для випадку нестационарного витікання, тобто з урахуванням змін, що відбуваються в часі та визначаються наявністю змінної  $\tau$ , одержали систему

$$\begin{cases} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_r) = 0, \\ \frac{\partial v_r}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r}(r \cdot v_r) \right) \right], \\ \frac{\partial v_z}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right]. \end{cases} \quad (11)$$

Виконавши математичні перетворення в системі рівнянь (11) і застосувавши сучасні методи розв'язання диференціальних рівнянь (метод розділення змінних сумою), отримали

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

де  $C_i$  – константи рівнянь.

До першого рівняння системи (12) для визначення закону зміни тиску вздовж струменя входить функція  $F(\tau)$ , що залежить від часу.

Вигляд цієї функції визначали з граничних умов, вважаючи, що початок координат поєднаний із центром отвору, з якого відбувається витікання розплаву. Тоді при  $z = 0$ :

$$P = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + P_1(\tau). \quad (13)$$

Зробили припущення, що в отворі, з якого витікає рідина, тиск змінюється відповідно до залежності

$$P_1 = a \sin(\omega\tau + c) + d. \quad (14)$$

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

$$P = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + a \sin(\omega\tau + c) + d. \quad (15)$$

На рис. 5 побудовано графік за рівнянням (15), який показує як змінюється величина тиску вздовж струменя води під час витікання з отвору за умови, що початкова

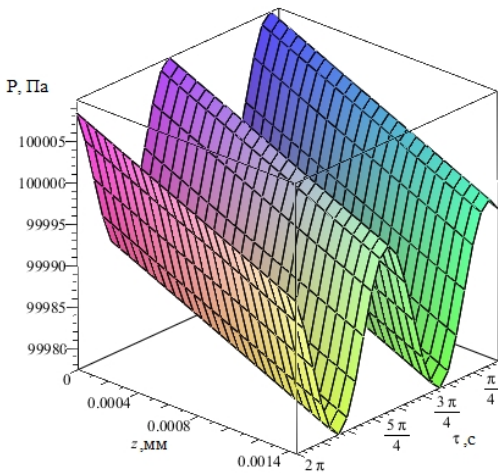


Рис. 5. Зміна тиску вздовж струменя з часом

амплітуда коливань, яка виникає на поверхні струменя, дорівнює 100 мкм, а частота коливань становить 350 Гц.

У третьому розділі наведено результати дослідження характеристик процесу диспергування струменя і вплив на них гідромеханічних параметрів вібраційного обладнання. Вивчення процесу проводилося на двох експериментальних установках. На першій установці (рис. 6) проводилися дослідження та вивчення процесу диспергування рідини, виявлення впливу швидкості та фізичних властивостей рідини, діаметра отворів витікання рідини на формування крапель при мимовільному розпаді струменя. На другій установці (рис. 7) проводилися дослідження та вивчення впливу швидкості витікання рідини та параметрів вимушеного сигналу, який накладається на струмінь, та режими вимушеного розпаду струменя, що витікає з отвору.

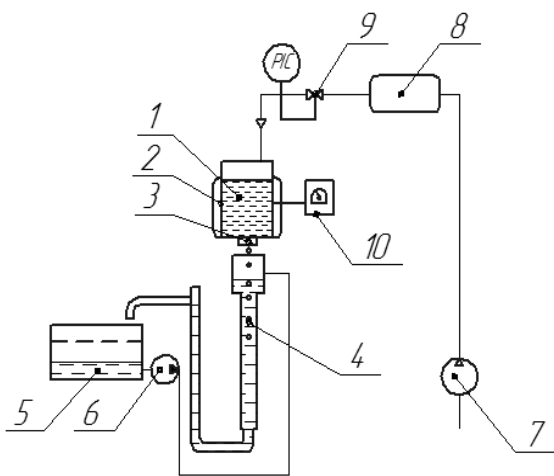


Рис. 6. Принципова схема лабораторної установки першого етапу досліджень: 1 – ємність; 2 – тен; 3 – змінна фільтера; 4 – U-подібна ємність; 5 – збірник гранул; 6 – насос; 7 – компресор; 8 – система надлишкового тиску; 9 – стабілізатор тиску; 10 – система регулювання температури

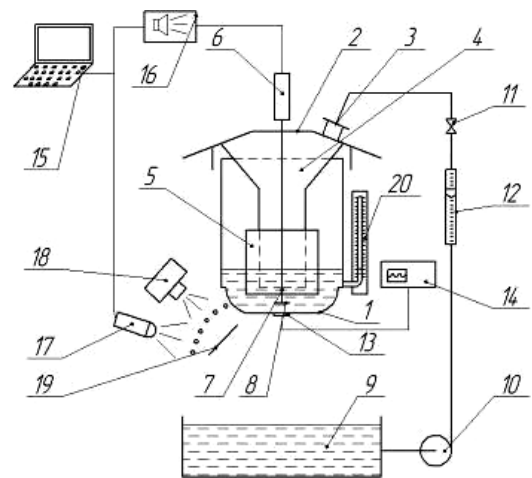


Рис. 7. Експериментальний стенд вібраційного гранулятора: 1 – змінне перфо-роване днище; 2 – корпус; 3 – патрубок; 4 – колектор; 5 – фільтрувальний елемент; 6 – електромагнітний вібратор; 7 – шток; 8 – резонатор (диск); 9 – буферна ємність; 10 – насос; 11 – вентиль; 12 – ротаметр; 13 – датчик коливань; 14 – осцилограф; 15 – комп'ютер; 16 – підсилювач низької частоти; 17 – стробоскоп; 18 – фотокамера; 19 – екран зі шкалою; 20 – вимірювач рівня

Під час досліджень змінними параметрами сигналу були: частота сигналу, що змінювалася в діапазоні 200–1500 Гц, амплітуд 4,4 і 10,4 В. Отримані фотографії під час досліджень були проаналізовані пакетом прикладних програм для розв'язання задач технічних обчислень MATLAB (Matrix Laboratory), що дало можливість визначити розміри крапель, відстань між ними й інші геометричні параметри.

Результати експериментів показують, що вплив різної величини імпульсу

на струмені рідини призводить до зміни режиму її розпаду та діаметра одержуваних крапель. Це свідчить про необхідність урахування зазначеного частотного впливу під час використання в розрахунках. Установлено константи системи рівнянь (15), що дає можливість проводити розрахунки параметрів вимушеного сигналу для отримання монодисперсного продукту із заданими розмірами. Установлено характер поширення збурень, що виникають на поверхні струменя при накладанні вимушених коливань залежно від параметрів сигналу, що надходить з вібратора. Досліджено та отримано максимально ефективне значення частоти сигналу залежно від рівня розплаву в корпусі гранулятора для створення монодисперсного розпаду струменів на краплі.

У четвертому розділі наведено порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень процесу диспергування рідини методом вимушеного коливання струменя. Розроблена інженерна методика розрахунку гідромеханічних параметрів гранулятора для умов створення крапель монодисперсного складу.

Для аналізу отриманих результатів був обраний діапазон крапель 2–2,5 мм, відповідно до основних потреб підприємств та ГОСТ 2-85.

Було зроблене припущення, що наявність значної величини радіальної складової швидкості призводить до порушення цілісності струменя. За допомогою рівняння (10), задаючись величиною радіальної складової швидкості, можна визначити передбачуваний перетин розриву струменя. Осьову складову швидкості рідини струменя в цьому перетині можна визначити за рівнянням (9).

Проведено розрахунок діаметра краплі, що утворюється під час розпаду струменя, на прикладі розпаду струменя 1 % розчину агар-агару, властивості якого при температурі 95 °С близькі до властивостей аміачної селітри. Початкова швидкість витікання розчину становила 1 м/с з отвору діаметром 1,2 мм. Для дослідження процесу розпаду струменя був обраний 1 % розчин агар-агару, оскільки при охолодженні до температури 35–40 °С він стає твердим гелем, що зручно для аналізу отриманих результатів під час дослідження. За заданими початковими даними та за допомогою рівняння (10) побудовано графік зміни радіальної складової швидкості  $v_r$  відстані від отвору витікання уздовж осі  $z$  до критичного перерізу (рис. 8 а). Припускали, що заштрихована область утворює об'єм циліндричної частини струменя (рис. 8 а), що формує об'єм краплі. Вважали, що процес розпаду струменя регулярний, тоді, застосувавши на цьому контрольному об'ємі рівняння балансу маси, тобто деякий об'єм циліндричної частини, струменя дорівнюватиме об'єму утвореної краплі:

$$V_{cm} = \frac{\pi \cdot D_j^2}{4} \cdot l_{cm} = V_{кр} = \frac{\pi d_{кр}^3}{6} . \quad (16)$$

Для розрахунку об'єму циліндричної частини струменя  $V_{ст}$  визначили довжину частини струменя  $l_{cm}$ , що формує об'єм краплі. Припускали, що при досягненні критичного значення швидкості  $v_r^{кр} = 3,5$  м/с відбудеться розпад струменя з утворенням краплі. Скориставшись графіком (рис. 8 а), отримали, що розпад струменя відбувається при досягненні відстані від отвору витікання

довжини  $z = l_{cm} = 0,00145\text{ м}$  (рис. 8 а).

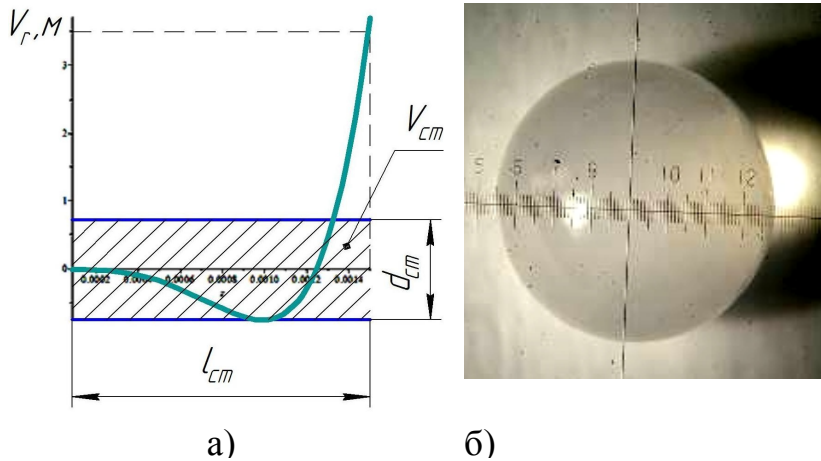


Рис. 8. Зіставлення результатів експерименту та теоретичних припущень: а) залежність зміни радіальної складової швидкості  $v_r$  від відстані уздовж осі  $z$ ; б) гранула агар-агару, що була отримана під час експериментальних досліджень, діаметр гранули 2,58 мм (1 поділка = 0,04мм).

Отримавши значення довжини струменя  $l_{cm}$ , розрахували об'єм циліндричної частини струменя за рівнянням (16), який дорівнює об'єму утвореної краплі  $V_{cm} = V_{кр} = 7,232 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ . Використавши отримане значення об'єму краплі, визначили діаметр утвореної краплі  $d_{кр}^m = 2,4 \text{ мм}$  і порівняли із результатами отриманих під час експерименту на лабораторному стенді  $d_{кр}^{ек} = 2,58 \text{ мм}$  (рис. 8 б). Похибка розрахункової формули, отриманої нами у порівнянні з експериментальними результатами, становила 7 %. Порівнявши діаметр утвореної краплі за вже широко апробованою формулою  $d_{кр} = \frac{6 \cdot d_{оме}}{Re^{0.15}} = 2,49 \text{ мм}$ , та отриманого з розрахунків за допомогою рівнянь (9) та (10) запропонованої методики, різниця в розрахунках становила приблизно 4,5 %.

Під час проведення експериментальних досліджень на другій установці (рис. 7) знімалися показники колювання днища гранулятора та виводилися на двоканальний осцилограф у вигляді графіка синусоподібної залежності, що змінювалася залежно від параметрів сигналу. Порівнявши отримані результати експерименту з теоретичними одержані за рівнянням (15), спостерігали розбіжність. Проаналізувавши одержані результати, дійшли висновку, що на струмінь діє ще сукупність збурень, джерелом яких є конструкція гранулятора, які повністю складно контролювати. Оскільки факторів, що впливають на характеристику залежності, безліч, їх складно врахувати в теоретичному розрахунку. Для отримання графічної залежності колювань, що генерує конструкція диспергатора, до отриманої синусоподібної залежності колювань усієї системи додали вимушені колювання, які утворює актуатор, скориставшись математичними операціями осцилографа. Проаналізувавши результат, отримали синусоподібну залежність. Спростивши й усереднивши отримані результати та додавши додаткову функцію в рівняння (15), отримали

$$P = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + a \sin(\omega\tau + c) + d + a_1 \sin(\omega_1\tau + c_1). \quad (17)$$

Це рівняння можна застосувати лише для аналізу роботи вібраційної системи

даної конструкції гранулятора.

Проведено порівняння результатів експериментальних досліджень, з уточненими теоретичними викладками, згідно з рівнянням (17).

При заповненні кошика гранулятора рідиною до рівня 380 мм при параметрах сигналу 380 Гц та амплітуді 10,2 В (що відповідає 100 мкм), спостерігали хвильове збурення на поверхні струменя із зонами розширення та звуження. Відбувався розпад струменя в монодисперсному режимі з утворенням крапель радіусом 1,092 мм (рис. 9 а). При розрахунках зміни тиску вздовж осі струменя за формулою (17) спостерігали залежність зміни тиску без будь-яких відхилень (рис. 9 в). При заповненні кошика гранулятора рідиною до рівня 280 мм та з розрахунку, що параметри вимушеного сигналу становлять амплітуду 10,2 В, частоту 220 Гц, то струмінь після витікання з отвору розпадався на основні краплі, які між собою з'єднані перемичками, після розриву яких утворюються чітко виражені сателіти (рис. 9 б).

Під час аналізу розвитку збурень на поверхні струменя за допомогою отриманого рівняння (17) спостерігалася нестабільна зміна тиску вздовж струменя. Тиск зростав і спадав, і так відбувалося по чергово (рис. 9 г), що відповідало режиму розпаду струменя з утворенням сателітів.

При іншому режимі та заповненні кошика гранулятора рідиною до рівня 280 мм, коли частота сигналу знаходиться в діапазоні 800 Гц і вище, відбувався розпил струменя з утворенням полідисперсного режиму розпаду струменя незалежно від значення амплітуди сигналу 4,4 (що відповідає 43 мкм) та 10,2 В (рис. 10 а). Це явище спостерігалось і при теоретичному розрахунку зміни тиску вздовж струменя з часом (рис. 10 б, в). Графічний аналіз рівняння (17) дає змогу передбачити вплив параметрів вимушених коливань та фізичних властивостей рідини на режим розпаду струменя.

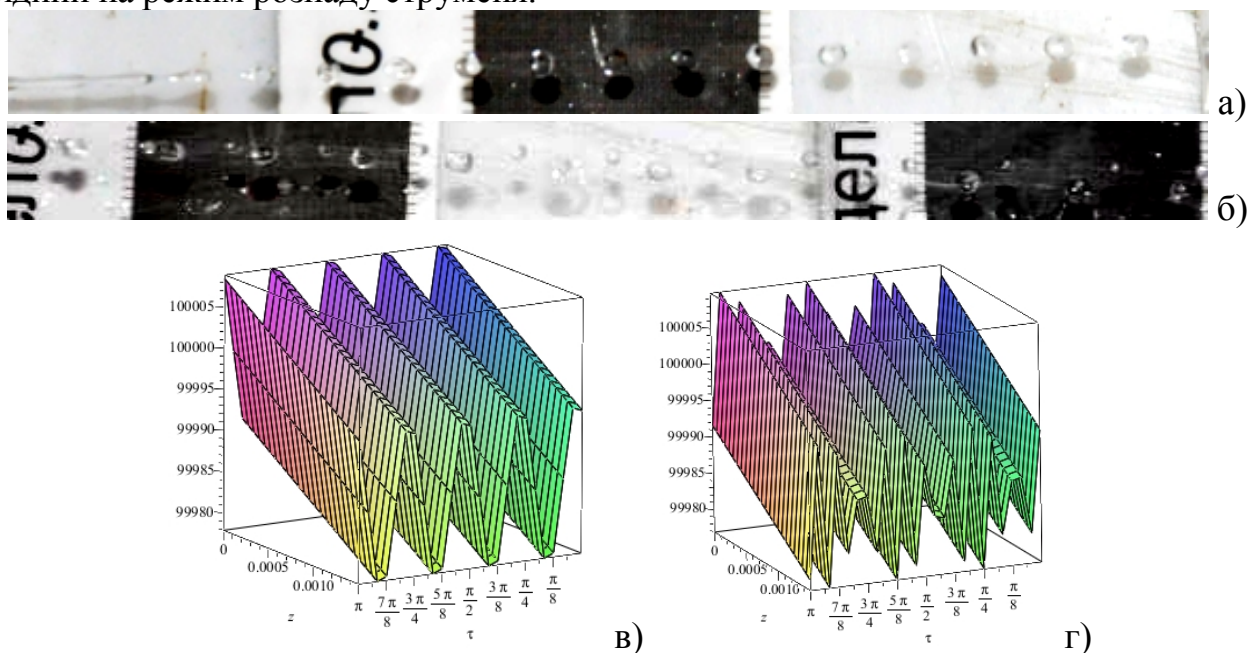
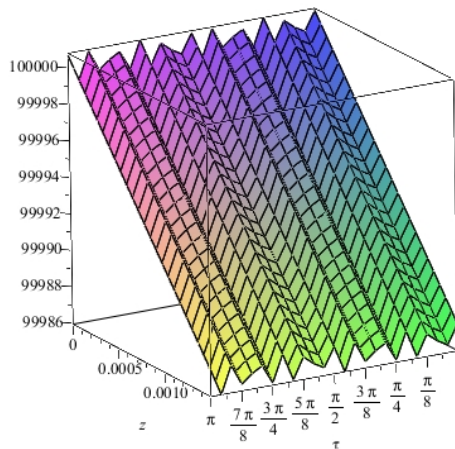


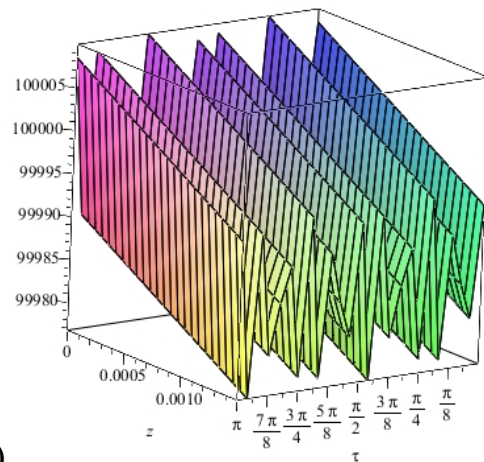
Рис. 9. Результати дослідження струменя при амплітуді коливань 10,2 В при фізичному експерименті: а) при частоті сигналу 380 Гц; б) при частоті сигналу 280 Гц; при теоретичного розрахунку за формулою (17); в) при частоті сигналу 380 Гц; г) при частоті сигналу 280 Гц



а)



б)



в)

Рис. 10. Результати дослідження струменя при частоті сигналу 750 Гц: а) фізичний експеримент при амплітуді коливань 4,4 В та 10,2 В ; б) результати теоретичного розрахунку за формулою (17) при амплітуді коливань 4,4 В; в) результати теоретичного розрахунку за формулою (17) при амплітуді коливань 10,2 В

Об'єднання отриманих експериментальних результатів із дослідження вимушеного розпаду струменя і теоретичних досліджень стало основою для проектування генератора низьких частот при модернізації існуючих грануляторів.

**У п'ятому розділі** наведені результати промислових випробувань обертових вібраційних грануляторів на грануляційних вежах та їх аналіз.

Промислове впровадження отриманих результатів під час дослідження обертових вібраційних грануляторів на підприємствах виконувалося згідно із госпдоговірними науково-дослідними роботами. Замовниками були ПрАТ «Северодонецьке об'єднання азот» та ПАТ «Концерн Стирол» Ostchem.

В існуючій технологічній схемі на грануляційній вежі АС-60 ПАТ «Концерн Стирол» на робочому покритті (відм. +30,5) було здійснено модернізацію вузла гранулювання. Модернізація здійснювалася за допомогою установки нового обладнання: модифікованого обертового вібраційного гранулятора.

Обертовий вібраційний гранулятор (ОВГ) забезпечив отримання продукту такого гранулометричного складу (рис. 11). При цьому масова частка гранул розміром 2,0–2,5 мм становила 46–52. При зміні діаметра факела, зрошення гранул у башті було відзначено вплив швидкості обертання гранулятора на монодисперсність і температуру готового продукту. При збільшенні швидкості обертання гранулятора зростає монодисперсність продукту і діаметр розподілу крапель по перерізу грануляційної вежі (факел зрошення), що зменшує ймовірність зіткнення крапель між собою. Крім того, зменшення щільності



зрошення крапель у перерізі грануляційної башта призводило до зниження її теплового навантаження. Оптимальна швидкість обертання гранулятора для умов виробництва аміачної селітри АС-60 ПАТ «Концерн Стирол» знаходилася в інтервалі  $0,8\text{--}0,97\text{ с}^{-1}$ . Результати досліджень наведені на рис. 12.

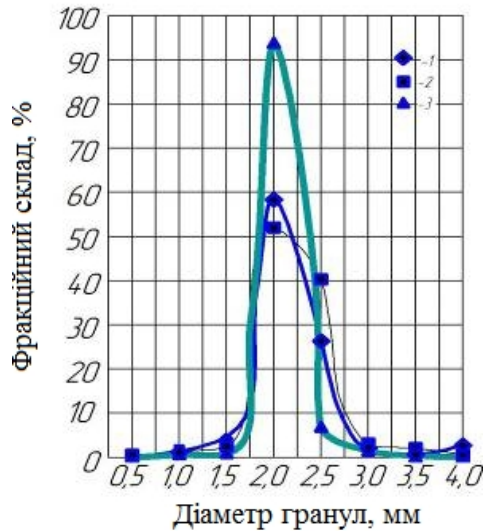


Рис. 11. Фракційний склад гранул аміачної селітри: 1 – експлуатований гранулятор типу ОВГ; 2 – акустичний гранулятор конструкції; 3 – модифікований гранулятор типу ОВГ

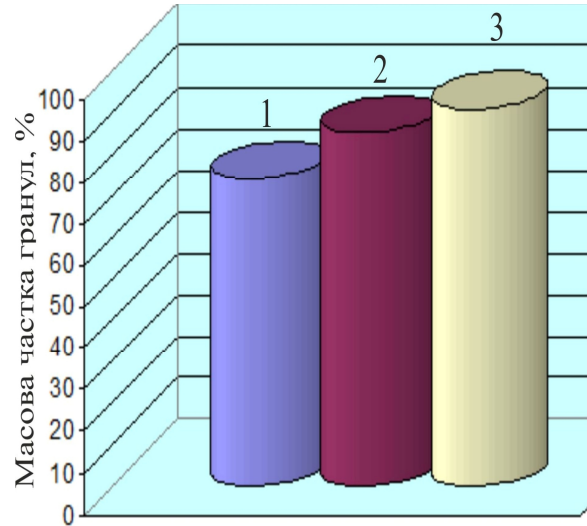


Рис. 12. Масова частка гранул розміром 2,0–2,5 мм при швидкості обертання гранулятора: 1)  $0,55\text{ с}^{-1}$ ; 2)  $0,8\text{ с}^{-1}$ ; 3)  $0,97\text{ с}^{-1}$

Отримання продукту із зазначеним вище гранулометричним складом і оптимальною швидкістю обертання днища, дозволило знизити температуру готового продукту на  $2\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , порівняно з температурою гранул, що одержуються на експлуатованих грануляторах. При випробуванні модифікованого обертового вібраційного гранулятора було відзначено значне скорочення вмісту пилу аміачної селітри в повітрі, який відводиться з башти. Цей показник в осьових вентиляторах становив від 22 до  $48\text{ мг/м}^3$ , при середніх значеннях – від 22 до  $38\text{ мг/м}^3$ . Випробування модифікованого вібраційного гранулятора типу ОВГ, що обертається, також підтвердили раніше проведені дослідження, в ході яких було відмічено вплив потужності вібрації, що накладається в об'ємі розплаву, на монодисперсність розпаду струменів на краплі.

Зниження потужності вібратора від 70 до 40 Вт призводило до зменшення частки цільової фракції гранул 2,0–2,5 мм від 91,5 до 78,8 % при цьому відбувалося збільшення вмісту гранул фракції понад 2,5 мм. Застосування модернізованого обертового вібраційного гранулятора дає можливість отримувати монодисперсні гранули розміром 2,0–3,0 мм більше 90 % і фракції менше 1,0 мм не більше 0,5 % і, навіть, можливе досягнення більш низької частки.

Крім того, застосування більш ефективною та гнучкою системи накладення

вібрації, дозволяє отримувати в продукті понад 85 % гранул в діапазоні 2,0–2,5 мм, або не менше 65 % гранул фракції 2,5–3,0 мм. Усе це дає можливість підвищити монодисперсність продукту і поліпшити якість одержаних азотних добрив, при цьому зменшити викиди пилу аміачної селітри в навколишнє середовище.

Приблизний економічний ефект від застосування модернізованого грануляційного обладнання за рахунок зниження втрат продукту з пилом становить понад 720 т/рік для агрегату АС-60 для однієї башти.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі подано вирішення важливого науково-технічного завдання – диспергування розплавів азотних добрив методом вимушеного розпаду струменів рідини, підвищення монодисперсності крапель та гранул.

1. У результаті проведення аналізу літературних джерел виявлено, що процес диспергування розплавів у баштах прилювання досліджених недостатньо, зокрема гідродинаміка у порожнині перфорованої оболонки із використанням лопатевої системи і струменя до розпаду на краплі з накладенням вібрації та при вільному режимі витікання. Визначено напрямки досліджень.

2. Запропоновано аналітичні рівняння для опису гідродинаміки витікання струменя, що дають можливість аналізувати процес диспергування струменя. Встановлено закономірності регульованого розпаду струменів рідини, що дає можливість доповнити методику розрахунку грануляторів розплаву азотних добрив, що дозволять отримувати гранули у вузькому фракційному діапазоні, при максимальній кількості часток, розмір яких може охолодитися у башті; забезпечити можливість регулювання розміру крапель залежно від вимог.

3. Моделювання процесу із використанням отриманих рівнянь дозволило уточнити методику розрахунку гідродинаміки витікання струменів розплаву з ОВГ і розробити рекомендації з автоматичного керування частотою вібратора ОВГ, залежно від гідродинамічних параметрів розплаву всередині оболонки диспергатора.

4. Експериментально досліджена гідродинаміка витікання струменя з отвору із накладанням вимушених коливань. На підставі рівнянь гідродинаміки запропоновано математичну модель, що враховує поширення коливань тиску вздовж струменя.

5. Об'єднання отриманих експериментальних результатів і теоретичних досліджень стало основою для проектування генератора низьких частот при модернізації існуючих грануляторів, що дозволяють:

– автоматично визначати оптимальну частоту сигналу при зміні рівня розплаву в корпусі гранулятора;

– вибирати режим роботи для літніх умов, коли потрібний менший розмір одержуваних крапель, і режим роботи ОВГ взимку, коли можна отримати більший розмір крапель, що у свою чергу, дозволяє регулювати теплове навантаження башти;

– підвищити монодисперсність гранул (більше 98 % цільової фракції), що покращує якість готової продукції і відповідає міжнародним стандартам, підвищує конкурентоспроможність цієї продукції на світовому ринку мінеральних добрив.

6. Вибір оптимального режиму роботи генератора низьких частот значно знижує кількість пилу в продукті (із 0,8–1,2 % до 0,05–0,2 %), зменшує втрати продукції з викидами в атмосферу (із 200–250 мг/м<sup>3</sup> до 25–40 мг/м<sup>3</sup>), що приводить до поліпшення екологічної обстановки.

7. Модернізовано відому конструкцію обертового вібраційного гранулятора з урахуванням автоматичного блока керування актуатором та обертами гранулятора розплаву.

### Основні умовні позначення

$v_r$  – радіальна компонента швидкості струменя, м/с;  $v_z$  – осьова компонента швидкості струменя, м/с;  $v_\theta$  – тангенціальна складова швидкості струменя, м/с;  $P$  – тиск на поверхні струменя уздовж осі, Па;  $\beta_2$  – вихідний кут лопатей, град.;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  – відстань уздовж струменя, м;  $p_0$  – тиск навколишнього середовища, Па;  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м<sup>2</sup>·с;  $V_{z0}$  – початкова швидкість витікання рідини з отвору, м/с;  $a$  – амплітуда коливань, мкм (В);  $\omega$  – колова частота коливань, с<sup>-1</sup>;  $D_j$  – діаметр струменя, м;  $V_{ст}$  – об'єм циліндричної частини струменя, м<sup>3</sup>;  $V_{кр}$  – об'єм краплі, м<sup>3</sup>;  $l_{cm}$  – довжина циліндричної частини струменя, що формує об'єм краплі, м;  $d_{отв}$  – діаметр отвору витікання рідини, м;  $d_{кр}$  – діаметр краплі, м.

**Безрозмірні комплекси:**  $We = \rho \cdot v^2 \cdot d / \sigma$  – число Вебера;  $Re = \rho \cdot v \cdot d / \mu$  – число Рейнольдса.

### Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Скиданенко М. С. Аналіз гідродинаміки стаціонарного витікання струменя / М. С. Скиданенко, В. І. Склабінський // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2013. – № 1. – С. 79–85. *Особистий внесок: розроблено математичну модель стаціонарного витікання струменя з отвору, що дозволяє проводити аналіз гідродинаміки струменя.*

2. Склабінський В. І. Експериментальне дослідження впливу температури та концентрації розчину на якість монодисперсних гранул / В. І. Склабінський, А. Є. Артюхов, М. С. Скиданенко // Наукові праці ОНАХТ. Серія Технічні науки. – 2012. – Т. 2, вип. 41. – С. 127–129. *Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, що дозволяють визначити оптимальні характеристики диспергуючої рідини.*

3. Скиданенко М. С. Исследование процесса истечения струи жидкости из отверстия перфорированной оболочки приллера / М. С. Скиданенко, В. И. Склабинский, Н. П. Кононенко // Вісник НТУ ХП. Серія Нові рішення в сучасних технологіях. – 2014. – № 26 (1069). – С. 186–192. *Особистий внесок: розроблення математичної моделі, зіставлення теоретичних та*

*експериментальних досліджень процесу нестационарного витікання струменя рідини з отвору, що є базовим для розрахунку віброгранулятора.*

4. Склабинский В. И. Эффективность промышленного внедрения модернизированного вращающегося вибрационного гранулятора плава в агрегатах получения аммиачной селитры / В. И. Склабинский, Н. П. Кононенко, М. С. Скиданенко // Хімічна промисловість України. – 2012. – № 3 (110). – С. 73–76. *Особистий внесок: проведено аналіз результатів дослідно-промислових випробувань модифікованого обертового вібраційного гранулятора.*

5. Склабинский В. И. Технический аудит узлов грануляции расплава в производстве минеральных удобрений башенным способом / В. И. Склабинский, М. С. Скиданенко, Н. П. Кононенко // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. - № 3/2 (17). – С. 15–22. *Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень впливу частоти та амплітуди низькочастотного сигналу на процес диспергування рідини.*

6. Скиданенко М. С. Аналіз гідродинаміки в порожнистій перфорованій оболонці відцентрового вібраційного гранулятора / М. С. Скиданенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. Серія: Технології органічних і неорганічних речовин. – 2014. – № 3/7 (69). – С. 30–35. *Особистий внесок: проведення численних досліджень характеру розподілу швидкості руху розплаву в порожнині оболонки (кошика обертового гранулятора).*

7. Скиданенко М. С. Перспективи отримання мікрогранул у вібраційних грануляторах / М. С. Скиданенко, А. Є. Артюхов, В. І. Склабинський // Сучасні технології в промисловому виробництві матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 18–22 квітня 2011 року. : тези доповідей. – Суми : СумДУ, 2011. – Ч.1. – С. 117. *Особистий внесок: доведено перспективи використання вібраційних грануляторів для одержання монодисперсних гранул.*

8. Оцінка можливості застосування вібраційних грануляторів для одержання мікрогранул / М. С. Скиданенко, А. В. Іванія, А. Є. Артюхов, В. І. Склабинський // Инженерные средства и методы оптимизации химических производств : материалы Всеукраинской конференции с международным участием (17–19 мая 2011 г.) : тези доповідей. – Дніпропетровськ : Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», 2011. – С. 72–73. *Особистий внесок: проведено порівняння апаратного аналізу оформлення процесу диспергування.*

9. Скиданенко М. С. Визначення впливу фізико-хімічних властивостей середовищ на якість монодисперсних мікрогранул / М. С. Скиданенко, В. І. Склабинський, А. Є. Артюхов, А. В. Іванія // Хімія та хімічні технології : матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених (ССТ – 2011) (24–26 листопада 2011 р.): тези доповідей. – Львів: Львівська політехніка, 2011. – С. 196-197. *Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень та їх математична обробка.*

10. Скиданенко М. С. Дослідження гідродинаміки пристроїв для створення монодисперсних мікрокрапель / М. С. Скиданенко, В. І. Склабинський, А. Є. Артюхов, С. О. Лугова // Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і

системах сталого розвитку : збірник наукових статей Третьої міжнародної науково-практичної конференції (10–12 травня 2012 р.) : тези доповідей. – Київ; Рубіжне: Національний технічний університет України «КПІ», 2012. – С. 85–87. *Особистий внесок: теоретичне дослідження гідродинаміки в об'ємі корпусу вібраційного гранулятора.*

11. Касим Р. Т. Способи отримання крапель монодисперсного складу / Р. Т. Касим, М. С. Скиданенко, В. І. Склабінський // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 17–20 квітня 2012 р. : тези доповідей. – Суми : СумДУ, 2012. – Ч. 2. – С. 116–117. *Особистий внесок: обґрунтовано доцільність використання вібраційних грануляторів для отримання монодисперсного продукту великотоннажного виробництва.*

12. Артюхов А. Е. Исследование условий истечения струи и формирования монодисперсных микрокапель в потоке охлаждающей среды / А. Е. Артюхов, М. С. Скиданенко // II Международная Казахстанско-Российская конференция по химии и химической технологии, посвященная 40-летию КарГУ имени академика Е. А. Букетова: материалы конференции (28 февраля–2 марта 2012 г.) : тезисы докладов. – Караганда : Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова, 2012. – С. 43–47. *Особистий внесок: запропоновано комплексний підхід до відпрацювання технології отримання монодисперсних гранул.*

13. Скиданенко М. С. Вплив геометричних параметрів отвору та сили сигналу на монодисперсний розпад струменя / М. С. Скиданенко, В. І. Склабінський // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів ф-ту технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 23–26 квітня 2013 р. : тези доповідей. – Суми : СумДУ, 2013. – Ч. 2. – С. 125. *Особистий внесок : проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів.*

14. Скиданенко М. С. Розповсюдження коливань тиску у зоні формування крапель віброгранулятора / М. С. Скиданенко, В. І. Склабінський // Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте : материалы Международной научно-практической интернет-конференции, 18–19 июня 2013 г. : тезисы докладов. – С. 28–36. *Особистий внесок: розроблено математичну модель розповсюдження коливань.*

15. Склабінський В. І. Підвищення ефективності отримання монодисперсних гранул / В. І. Склабінський, А. Є. Артюхов, М. С. Скиданенко // I Міжнародна науково-технічна конференція «Хімічна технологія: наука та виробництво», м. Шостка 7–9 листопада 2012 року. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – С. 97. *Особистий внесок: запропоновано метод модернізації вібраційного гранулятора.*

16. Sklabinskyi V. I. Equipment for production of granulated fertilizers and granules with porous structure / V. I. Sklabinskyi, N. P. Kononenko, A. E. Artyukhov, M. S. Skidanenko // International Ukrainian-Japanese Conference on Scientific and Industrial Cooperation; 24 – 25 October 2013. : abstracts. – Odessa : ONPU, 2013. – P. 176–178. *Особистий внесок: результати реалізації вібраційного гранулятора*

*для виробництва азотних добрив методом прилювання.*

17. Скиданенко М. С. Теоретичне дослідження гідродинаміки руху рідини в струмені вимушених коливань / М. С. Скиданенко // Сучасні технології у промисловому виробництві : III Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція, м. Суми, 22 – 25 квітня 2014 р. : тези доповідей. – Суми : СумДУ, 2012. – Ч. 2. – С. 79. *Особистий внесок: подано теоретичні дослідження, що дають можливість створити сучасну (удосконалену) конструкцію обертового вібраційного розбризкувача розплаву азотних мінеральних добрив.*

## АНОТАЦІЯ

**Скиданенко М. С. Гідромеханічні показники пристроїв для отримання монодисперсних крапель та гранул. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Сумський державний університет міністерство освіти і науки України, Суми, 2014.

Дисертаційна робота присвячена теоретичним та експериментальним дослідженням гідродинаміки процесу диспергування рідини при мимовільних і вимушених коливаннях, що виникають на поверхні струменя, що дасть можливість підвищити монодисперсність продукту, отриманого за допомогою обертового вібраційного гранулятора. Експериментально досліджено гідродинаміку витікання струменя і факторів, які впливають на режими його розпаду. Запропоновано аналітичні рівняння, які дозволяють аналізувати процес диспергування струменя. Отримані рівняння регулярного розпаду струменя, що дає можливість доповнити методику розрахунку обертових вібраційних грануляторів розплаву азотних добрив.

Теоретичні розрахунки були підтверджені результатами експериментальних досліджень, тобто розроблена математична модель може бути застосована для розрахунку діаметра краплі при диспергуванні рідини методом накладення вимушених коливань на струмінь. Отримані результати стали основою для розробки генератора низьких частот, що дозволило модернізувати існуючу конструкцію і підвищити монодисперсність готової продукції.

Основні результати дисертаційної роботи були впроваджені при виконанні госпдоговірних науково-дослідних робіт. Промислові випробування підтвердили ефективність роботи модернізованого гранулятора.

**Ключові слова:** диспергування, гідродинаміка, вимушені коливання, мінеральні добрива, обертовий вібраційний гранулятор, сателіт, прилювання, монодисперсність.

## АННОТАЦИЯ

**Скиданенко М. С. Гидромеханические показатели для получения монодисперсных капель и гранул. – Рукопис.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Сумский государственный университет министерство образования и науки Украины, Сумы, 2014.

Диссертационная работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям гидродинамики процесса диспергирования жидкости при самопроизвольных и вынужденных колебаниях, возникающих на поверхности струи, которые приводят к его распаду на капли.

Проведены экспериментальные исследования гидродинамики истечения струи в процессе диспергирования до ее распада на капли. Определено, что режимы распада струи зависят от скорости истечения и механических параметров генератора низких частот. На основании обобщенных экспериментальных данных было уточнено уравнение для описания изменения давления вдоль струи с учетом влияния собственных колебаний конструкции.

Предложены аналитические уравнения для описания гидродинамических параметров истекающей струи из отверстия, позволяющие анализировать процесс диспергирования. Получены закономерности регулярного распада струи жидкости, что позволяет дополнить методику расчета вращающихся вибрационных грануляторов расплавов азотных удобрений.

Теоретические расчеты были подтверждены результатами экспериментальных исследований, т. е. разработанная математическая модель может быть применена для расчета диаметра капли при диспергировании жидкости методом наложения вынужденных колебаний на струю.

Объединение полученных результатов стало основой для разработки генератора низких частот, что позволило модернизировать существующую конструкцию гранулятора. Улучшенная конструкция гранулятора позволяет автоматически определять и регулировать оптимальные частоты сигнала в зависимости от уровня расплава в грануляторе, что позволило повысить монодисперсность готовой продукции, уменьшить потери продукции в виде пыли, и, тем самым, улучшить экологическую обстановку вокруг предприятия.

Проведены промышленные испытания модернизированного гранулятора. Анализ результатов испытаний гранулирования аммиачной селитры показал, что оптимальная скорость вращения гранулятора находится в интервале  $0,8-0,97 \text{ с}^{-1}$ , при этом происходит равномерное распределение гранул по сечению грануляционной башни, что приводит к снижению ее тепловой нагрузки.

Основные результаты диссертационной работы были внедрены при выполнении хозяйственных научно-исследовательских работ. Промышленные испытания подтвердили эффективность работы модернизированного гранулятора.

**Ключевые слова:** диспергирование, гидродинамика, вынужденные колебания, минеральные удобрения, вращающийся вибрационный гранулятор, сателлит, приллирование, монодисперсность.

## ANNOTATION

### **Skidanenko M. S. Hydromechanical Indicators for Producing Monodispersed Droplets and Granules. – Manuscript.**

Ph. D. thesis in Technical Science in speciality 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – Sumy State University ministry of education and science of Ukraine, Sumy, 2014.

Thesis is devoted to the theoretical and experimental studies of liquid dispersion hydrodynamics in spontaneous and forced vibrations arising on the surface of the jet, which enables to increase monodispersity of the granules obtained by using rotating vibro-granulator. Hydrodynamics of the jet efflux and factors affecting its disintegration modes are experimentally studied. Analytical equations for analyzing the jet dispersion are proposed. Equations of regular jet disintegration are obtained and it enables to update the calculation methodology of rotating vibro-granulators for fusion of nitrogen fertilizers.

Theoretical calculations were proved by the experiments results which mean that the developed mathematical model can be used for the calculation of droplet diameter when dispersing liquid using the method of imposing the forced vibrations on the jet. Obtained results became the basis for the development of the special-frequency generator, which helped to modernize the existing device and increase monodispersity of the finished product.

The main results of this thesis have been implemented for fulfilling of contractual research work. Industrial trials have confirmed the effectiveness of the modernized granulator.

**Key words:** dispersion, hydrodynamics, forced vibrations, mineral fertilizers, rotating vibro-granulator, satellite, prilling, monodispersity.



Підписано до друку 10.11.2014 р.  
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 715.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007 р.