

ГІДРОДИНАМІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ МОНОДИСПЕРСНИХ ГРАНУЛ ДЛЯ РЕСУРСОЕФЕКТИВНИХ АГРОТЕХНОЛОГІЙ

Забіцький Д.В., аспірант
Сумський державний університет
<http://orcid.org/0000-0003-4761-0765>

Анотація: У роботі розглянуто процес формування гранул у технологіях виробництва мінеральних добрив з позицій гідродинаміки розпаду рідинного струменя. На основі аналітичного підходу, що базується на теорії нестійкості Релея–Плато з урахуванням в'язкісних ефектів за моделлю Томотіки, встановлено, що диспергування струменя відбувається в інерційно-капілярному режимі, який забезпечує формування крапель із вузьким розподілом розмірів. Визначено характерні параметри процесу та показано, що відхилення розрахункових значень діаметра гранул не перевищує 7%. Обґрунтовано можливість керованого формування монодисперсних гранул без додаткового збудження струменя, що створює передумови для розроблення ресурсоефективних технологій грануляції з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: рідинний струмінь, капілярна нестійкість, інерційно-капілярний режим, число Вебера, число Онезорге, диспергування, розподіл частинок, керування процесами.

Інтенсифікація сільськогосподарського виробництва в умовах післявоєнного відновлення України потребує впровадження екологічно безпечних та ресурсоефективних технологій, зокрема у сфері виробництва мінеральних добрив. Одним із важливих напрямів підвищення ефективності агротехнологій є забезпечення стабільних фізико-механічних характеристик гранульованих продуктів, що безпосередньо впливає на їх транспортабельність, рівномірність внесення та засвоюваність рослинами [1].

Відомо, що формування гранул у процесах грануляції визначається сукупністю гідродинамічних, капілярних та реологічних факторів, які обумовлюють механізми розпаду рідинних струменів та подальшого утворення крапель [2]. Класична теорія нестійкості струменя, започаткована у роботах Релея, описує капілярний розпад струменя на краплі внаслідок зростання малих збурень, довжина хвилі яких перевищує периметр струменя. Подальший розвиток цієї теорії, зокрема, у сучасних дослідженнях нестійкості струменів та краплеутворення, дозволив врахувати вплив в'язкості та навколишнього середовища на параметри нестійкості та характер диспергування [3, 4].

Сучасні дослідження підтверджують, що ключову роль у формуванні розмірного складу гранул відіграють безрозмірні критерії подібності, зокрема

числа Вебера та Онезорге, які визначають співвідношення інерційних, в'язкісних і капілярних сил у системі [5]. При цьому встановлено, що у широкому діапазоні технологічних режимів процес грануляції може протікати в інерційно-капілярному режимі, що забезпечує формування крапель із відносно вузьким розподілом розмірів [6].

Разом із тим, у більшості існуючих технологій виробництва мінеральних добрив спостерігається значна полідисперсність гранул, що призводить до нерівномірності їх фізико-хімічних властивостей, перевитрат сировини та зниження ефективності застосування [7]. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває проблема керованого формування монодисперсних гранул як основи підвищення ресурсоефективності агротехнологій. Метою роботи є встановлення гідродинамічних закономірностей формування монодисперсних гранул у процесах виробництва мінеральних добрив та обґрунтування можливості керування їх розмірними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети використано аналітичний підхід, заснований на теорії нестійкості рідинного струменя (Релея–Плато) з урахуванням впливу в'язкості відповідно до моделі Томотіки. Оцінку режимів диспергування проведено з використанням безрозмірних критеріїв подібності, зокрема чисел Вебера та Онезорге, що дозволяють визначити співвідношення інерційних, капілярних і в'язкісних сил у системі.

У результаті проведеного теоретичного аналізу встановлено, що розпад рідинного струменя в досліджуваних умовах відбувається в інерційно-капілярному режимі, при якому визначальну роль відіграє взаємодія інерційних та капілярних сил за відносно незначного впливу в'язкісних ефектів. Такий режим характеризується розвитком осесиметричних нестійкостей поверхні струменя, що призводять до його періодичного звуження та подальшого розриву з утворенням окремих крапель. Встановлено, що найбільш нестійка довжина хвилі збурень становить приблизно 4,5 діаметра струменя, що узгоджується з класичними положеннями теорії Релея та підтверджує адекватність застосованого аналітичного підходу для опису процесу первинного розпаду.

На основі отриманих залежностей визначено характерні геометричні параметри процесу, зокрема діаметр сформованих гранул, який знаходиться в межах 2,2–2,5 мм. Показано, що відхилення розрахункових значень від теоретично прогнозованих не перевищує 7%, що свідчить про достатньо високу точність використаної моделі та її придатність для інженерних оцінок. Отримані результати вказують на формування гранул із відносно вузьким розподілом розмірів, що є характерною ознакою квазістабільного інерційно-капілярного режиму диспергування.

При значеннях числа Онезорге близько 0,07 вплив в'язкісних сил на процес розпаду рідинного струменя є обмеженим, унаслідок чого визначальну роль у формуванні гранул відіграють інерційні та капілярні сили, які обумовлюють розвиток нестійкостей і механізм диспергування струменя. Водночас значення числа Вебера свідчать про відсутність суттєвого аеродинамічного впливу на процес розпаду, що дозволяє розглядати його як такий, що протікає переважно в

умовах інерційно-капілярної взаємодії без домінування зовнішніх збурюючих факторів.

Отримані результати підтверджують можливість керованого формування монодисперсних гранул у процесах грануляції навіть за відсутності додаткового збудження струменя, що є принципово важливим з точки зору спрощення технологічних схем, підвищення їх надійності та зниження енергетичних витрат. Встановлені гідродинамічні закономірності дозволяють не лише прогнозувати розмірний склад гранул, але й забезпечувати стабільність їх фізико-механічних характеристик, що створює передумови для цілеспрямованого керування якістю гранульованих продуктів та підвищення ефективності їх застосування в сучасних ресурсоефективних агротехнологіях.

Робота виконана за підтримки МОН України (ДР № 0125U000500 «Розроблення технологічних основ отримання складнозмішаних добрив монодисперсного складу») під керівництвом д-р.т.н., проф., г.н.с. Остроги Р.О.

Список використаних джерел

1. Marmottant, P., Villermaux, E. (2004). On spray formation. *J. Fluid Mech.*, 498, 73–111. doi: 10.1017/S0022112003006529.
2. Eggers, J., Villermaux, E. (2008). Physics of liquid jets. *Rep. Prog. Phys.*, 71, 036601. doi: 10.1088/0034-4885/71/3/036601.
3. Mousavi, S., Siavashi, M., Bagheri, M. (2023). Comparison of the jet breakup and droplet formation between non-Newtonian and Newtonian fluids. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 321, 105093. doi: 10.1016/j.jnnfm.2023.105093.
4. Barker, B., Bell, J.B., Garcia, A.L. (2023). Fluctuating hydrodynamics and the Rayleigh-Plateau instability. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 120, e2306088120. doi: 10.1073/pnas.2306088120.
5. Luo, L., Liu, Y., Li, X., Wang, Z. (2025). Review on the recent numerical studies of liquid atomization. *Appl. Sci.*, 15, 4928. doi: 10.3390/app15094928.
6. Kirar, P.K., Kumar, N., Sahu, K.C. (2024). Dynamics of jet breakup and the resultant drop size distribution: Effect of nozzle size and impingement velocity. *Phys. Fluids*, 36, 102108. doi: 10.1063/5.0225452.
7. Srinivasan, B., Sinha, A. (2024). Primary breakup of liquid jet – Effect of jet velocity profile. *Phys. Fluids*, 36, 032102. doi: 10.1063/5.0180724.

Abstract: The paper considers the granule formation process in mineral fertilizer production technologies from the standpoint of liquid jet breakup hydrodynamics. Based on an analytical approach grounded in the Rayleigh–Plateau instability theory with consideration of viscous effects according to the Tomotika model, it is established that jet disintegration occurs in an inertial-capillary regime, ensuring the formation of droplets with a narrow size distribution. The characteristic process parameters are determined, and it is shown that the deviation of the calculated granule diameter does not exceed 7%. The possibility of controlled formation of monodisperse granules without additional jet excitation is substantiated, which creates the basis for the development of resource-efficient granulation technologies with improved performance characteristics.

Keywords: liquid jet, capillary instability, inertial-capillary regime, Weber number, Ohnesorge number, atomization, particle size distribution, process control.