

ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ім. ІВАНА ПУЛЮЯ

ТАРАСЮК ВІКТОР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 637.11.021

**ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЗАСОБУ ФОРМУВАННЯ  
ГРАНУЛ НА ОСНОВІ САПРОПЕЛЮ**

05.05.11 – машини та засоби механізації сільськогосподарського  
виробництва

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Луцькому національному технічному університеті  
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор,  
**Дідух Володимир Федорович,**  
Львівський національний аграрний університет,  
завідувач кафедрою експлуатації та технічного сервісу машин  
ім. проф. О.Д. Семковича

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Гевко Роман Богданович,**  
Тернопільський національний економічний університет,  
Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, декан  
факультету аграрної економіки і менеджменту, завідувач  
кафедрою інженерного менеджменту.

кандидат технічних наук,  
**Щур Тарас Григорович,**  
Львівський національний аграрний університет, Міністерство  
промислової політики та продовольства України, в.о. доцента  
кафедри тракторів і автомобілів.

Захист відбудеться “26” грудня 2012 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.67.052.02 у Тернопільському національному технічному університеті ім. Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська 56, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська 56.

Автореферат розісланий “25” листопада 2012 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



П.В. Попович

Відповідальний за випуск Попович П.В.  
Підписано до друку 22.11.2012 р.  
Формат А5. Папір офсетний.  
Умовн. друк. аркушів 1,4  
Тираж 100 прим. Зам. № 295.

Редакційно-видавничий відділ ЛНТУ  
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75.

Ключевые слова: гранулятор, формирование гранул, температура, ретур, сапропель, органо-минеральные удобрения, качение по поверхности.

## ANNOTATION

Tarasjuk V. Substantiation of technology and means of forming of granules on the sapropel basis - Manuscript.

Dissertation for obtaining of degree of PhD of technical sciences, specialty 05.05.11 - Machinery and mechanization of agricultural production. – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2012.

The thesis is devoted to improving of the efficiency of formation of spherical granules from organic-mineral fertilizers on sapropels natural state basis with a reduction of humidity. A granulation technology by forming of granules of organic-mineral fertilizers on heated surface by rolling and design tool for its implementation was suggested. The form of a curved surface in the form of a cylinder sector is substantiated theoretically and formula for determination of the basic kinematic parameters of spherical granules and conditions for their movement within the established arc sector were submitted.

Physical and mechanical properties of granules of organic-mineral fertilizers on the sapropel basis within humidity at the stage of moving on heated surface were determined. Technological, structural and kinematic parameters of means of forming granules by organic-mineral fertilizers rolling were theoretically and experimentally established. The effect of internal moisture transfer beads to the surface area of contact with the heated element was analyzed and specific energy costs in

obtaining spherical granules organic-mineral fertilizers based on sapropel natural moisture were set.

The effectiveness of use of granules in agricultural production was carried out. Rational limit parameters of means of forming granules on sapropels with a natural moisture basis by a specified performance were recommended. Laboratory tests have established the economical suitability and technical and economic efficiency of the means.

**Keywords:** granulator, granule formation, temperature, retur, sapropel, organic fertilizers, rolling on the surface.

## Загальна характеристика роботи

**Актуальність теми.** Тема є актуальною і перспективною на сьогоднішній час в умовах дефіциту і високих цін на мінеральні добрива для збільшення їх асортименту та використання у сільськогосподарському виробництві. До таких відносяться органо-мінеральні добрива (ОМД) у складі органічна речовина + НРК. В свою чергу, використання органічної речовини місцевої сировинної бази дозволить зменшити собівартість кінцевої продукції та сприятиме збільшенню гумусоутворюючого матеріалу. Застосування сапропелю прісноводних озер в якості органічної складової при виробництві гранульованих ОМД доцільно проводити на територіях, де знаходяться значні їх запаси. Сапропель – це універсальна речовина, яка містить цілий комплекс елементів, необхідних для живлення рослин. При цьому досвід вказує, що при заміні традиційних видів органіки сапропелевими знижується собівартість виготовлення продукції на 80–120%. Крім цього, розробка сапропелевих родовищ виконує рекреаційну функцію з відновлення флори і фауни навколишнього середовища. Запаси сапропелю лише у Волинській і Рівненській областях становлять 100 років промислового виробництва.

Основною перепоною використання сапропелів природного стану у сільськогосподарському виробництві є його природна вологість, яка сягає до 98%. Відоме обладнання та засоби механізації не дають можливості його застосування у якості органічної складової при гранулюванні ОМД. Відсутні також наукові дослідження процесу гранулювання даного матеріалу. При цьому всі дані ґрунтуються на порівнянні сапропелю з торфом. Проте утворення озерного сапропелю відбувається без доступу кисню, тому він має свої особливі властивості. Отже, дослідження властивостей сапропелю природного стану у якості складової ОМД, а також у складі сапропель + НРК, дозволять запропонувати технологію та засіб гранулювання добрив, мінімізувати енергетичні затрати на створення продукції необхідної для сільськогосподарського виробництва, що є актуальним та своєчасним питанням для народного господарства держави.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за даною дисертаційною роботою виконані в Луцькому національному технічному університеті у відповідності до державної науково-технічної програми та державних науково-технічних програм ДНКТП з пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки в 2008- 2012рр. Основні положення дисертаційної роботи увійшли до звіту за темою “Дослідження взаємодії механізмів сільськогосподарських машин з матеріалами” (№ д/р 0100U000258), яка реалізується згідно з постановою Кабінету Міністрів “Про розвиток сільськогосподарського машинобудування і забезпечення агропромислового комплексу конкурентноздатною технікою”, та темою “Дослідження процесів і засобів післязбирального обробітку неоднорідних рослинних матеріалів” (№ д/р 010U000535) згідно тематичних планів науково-дослідних робіт Луцького НТУ.

**Мета роботи та завдання досліджень.** На основі аналізу стану механізації виробництва ОМД сформульовано мету роботи, яка полягає у підвищенні ефективності формування гранул кулястої форми з частинок органо-мінеральних сумішей (ОМС) на основі сапропелів природного стану із одночасним зниженням їх вологості методом кочення.

Для досягнення вказаної мети поставлені наступні завдання досліджень:

- проаналізувати технології виробництва органо-мінеральних добрив (ОМД) та ефективність їх використання при вирощуванні сільськогосподарських культур;
- запропонувати конструктивне рішення засобу формування гранул методом кочення нагрітою поверхнею;
- дослідити явище переносу теплоти в дисперсному середовищі від нагрітої поверхні до шару ОМД товщиною в одну гранулу;
- встановити фізико-механічні властивості гранул ОМД на основі сапропелів в межах їх вологості на стадії формування;
- визначити основні закономірності роботи засобу формування гранул ОМД методом кочення;
- розробити модель перетворення частинки довільної форми в кулю криволінійною поверхнею;
- встановити область раціональних значень конструктивних параметрів робочої поверхні засобу формування гранул ОМД на основі сапропелів природного стану;
- провести експериментальну перевірку запропонованого засобу формування гранул, оцінити техніко-економічну ефективність та надати рекомендації для виготовлення промислового зразка засобу формування гранул методом кочення.

**Об'єкт дослідження.** Процес формування гранул ОМД на основі сапропелів природного стану нагрітою поверхнею методом кочення.

**Предмет дослідження.** Вплив складових ОМС, технологічних і конструктивно-кінематичних параметрів нагрітої поверхні на якість формування гранул ОМД.

**Методи дослідження.** При проведенні теоретичних досліджень були використані сучасне уявлення про процеси кондуктивного сушіння, руху пластичного тіла по нагрітій поверхні з врахуванням елементів вищої математики, фізики дискретних середовищ, теоретичної механіки та математичної статистики.

Експериментальні дослідження проводились в лабораторних умовах за відомими та новими розробленими методиками. Доступні зразки отриманих гранул перевіряли на кількісні і якісні характеристики.

Раціональні технічні та конструктивно-кінематичні параметри засобу формування гранул визначали методом математичного планування багатofакторного експерименту.

Теоретичні розрахунки і статистична обробка дослідних даних проводились із застосуванням пакетів прикладних програм на ПК.

**Наукова новизна роботи** полягає в тому, що:

- вперше розроблена математична модель переносу тепла від рухомої поверхні до шару гранул ОМД та визначено сумарну кількість теплоти необхідної для їх затвердіння;
- вперше запропоновано модель перетворення попередньо виготовлених частинок з ОМС довільної форми у кулясту коливною поверхнею;
- за допомогою математичної моделі вперше описано процес кондуктивного сушіння рухомих частинок кулястої форми;
- обґрунтовані граничні режими нагрітої поверхні засобу формування гранул ОМД методом кочення за умов збереження їх якісних показників.

Проведено перевірку ефективності використання виготовлених гранул у сільськогосподарському виробництві. Рекомендовані раціональні межі параметрів засобу формування гранул на основі сапропелів природної вологості за заданою продуктивністю. Лабораторні випробування встановили господарську придатність і техніко-економічну ефективність даного засобу.

**Ключові слова:** гранулятор, формування гранул, температура, ретур, сапропель, органо-мінеральні добрива, кочення по поверхні.

## АННОТАЦІЯ

Тарасюк В.В. Обоснование технологии и средства формирования гранул на основании сапропеля. – Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук за специальностью 05.05.11 – машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. – Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя, Тернополь, 2012.

Диссертация посвящена повышению эффективности формирования гранул шаровидной формы из ОМС на основании сапропелей естественного состояния со снижением их влажности. Предложено обоснование технологии гранулирования путем формирования гранул ОМД нагретой поверхностью методом качения и конструкцию средства для ее реализации. Теоретически обоснованно форму криволинейной поверхности в виде сектора цилиндра и предложены формулы определения основных кинематических параметров гранулы шаровидной формы для условия их перемещения в пределах установленной дуги сектора.

Установленные физико-механические свойства гранул ОМД на основании сапропелей в пределах влажности на стадии формирования подвижной нагретой поверхностью. Теоретически установленные и экспериментально подтверждены технологические и конструктивно-кинематические параметры средства формирования гранул ОМД методом качения. Проанализировано явление передачи внутренней влаги гранулы на поверхность в зоне ее контакта с нагретым элементом и установлены удельные энергетические затраты при получении гранул ОМД шаровидной формы на основании сапропеля естественной влажности

Обоснованы состав и содержание двухкомпонентных смесей из озёрного сапропеля и минеральной части НРК, содержимое которого не должно быть меньше 50%. Доказана эффективность влияния ретура на сохранение шаровидной формы гранул в процессе их формирования.

Проведена проверка эффективности использования изготовленных гранул в сельскохозяйственном производстве. Изготовлен экспериментальный образец рабочей подвижной поверхности средства формирования гранул ОМД методом качения, проведена его экспериментальная проверка и разработанные рекомендации для изготовления промышленного образца. Рекомендованы рациональные пределы параметров средства формирования гранул на основании сапропелей естественной влажности за заданной производительностью. Лабораторные испытания установили хозяйственную пригодность и технико-экономическую эффективность данного средства.

І.В. Тараймович // Сільськогосподарські машини. – 36. наук. ст., Луцьк: ЛНТУ, 2012. – Вип. 22. – С.191-197. *Дисертанту належать теоретичне обґрунтування процесу та побудова графічних залежностей.*

10. Дідух В.В. Вплив вмісту сапропелю в ОМС на їх зневоднення / В.В. Дідух, В.В. Тарасюк // Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження. – Львів, 2012. – Т. 1, № 16. – С.120 – 132. *Дисертанту належать основні ідеї та формалізація даних.*

11. Тарасюк В.В. Ефективність використання ОМД на основі сапропелю в сільськогосподарському виробництві / В.В. Тарасюк, І.В. Тараймович, В.В. Грабовець // Міжвузівський збірник (за напрямком «Інженерна механіка») «Наукові нотатки» Луцьк, ЛНТУ, 2012. – Вип.38. – С. 198-201. *Дисертанту належать формулювання ідеї удосконалення технології.*

12. Пат. №61587 Україна, МПК G05F3/00 на корисну модель. Спосіб формування гранул органо-мінеральних добрив / Тарасюк В.В., Бабарика С.Ф., Дыдух В.Ф.; Заявлено 20.12.2010; Опубл. 25.07.2011; Бюл. № 14.

13. Пат. №66204 Україна, МПК B01J2/20 на корисну модель. Гранулятор органо-мінеральних добрив / Дідух В.Ф., Тарасюк В.В., Мошеров Ю.М.; Заявлено 14.06.2011; Опубл. 25.12.2011; Бюл. № 24.

14. Тарасюк В.В. Використання сапропелевих добрив для підвищення родючості ґрунтів / В.В. Тарасюк // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми розвитку регіональних АПК» (26-27 травня 2011 р.). – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2011. – С. 236-237.

## АНОТАЦІЯ

Тарасюк В.В. Обґрунтування технології та засобу формування гранул на основі сапропелю. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Тернопіль, 2012.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності формування гранул кулястої форми із ОМС на основі сапропелів природного стану із зниженням їх вологості. Запропоновано обґрунтування технології гранулювання шляхом формування гранул ОМД нагрітою поверхнею методом кочення та конструкцію засобу для її реалізації. Теоретично обґрунтовано форму криволінійної поверхні у вигляді сектору циліндра та запропоновано формули визначення основних кінематичних параметрів гранули кулястої форми для умови їх переміщення у межах встановленої дуги сектора.

Встановлені фізико-механічні властивості гранул ОМД на основі сапропелів у межах вологості на стадії формування рухомою нагрітою поверхнею. Теоретично встановлені та експериментально підтверджені технологічні і конструктивно-кінематичні параметри засобу формування гранул ОМД методом кочення. Проаналізовано явище передачі внутрішньої вологи гранули на поверхню у зоні її контакту з нагрітим елементом та встановлено питомі енергетичні затрати при отриманні гранул ОМД кулястої форми на основі сапропелю природної вологості

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі аналізу технологій виробництва ОМД, ефективності їх використання при вирощуванні сільськогосподарських культур запропоновано механізм формування гранул ОМД методом кочення. Вперше встановлені фізико-механічні властивості гранул ОМД на основі сапропелів у межах вологості на різних стадіях формування із збереженням кількісних і якісних показників параметрів.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено технологічні і конструктивно-кінематичні параметри засобу формування гранул ОМД методом кочення.

Виготовлено експериментальний зразок робочої рухомої поверхні засобу формування гранул ОМД методом кочення, проведено його експериментальну перевірку та розроблені рекомендації для виготовлення промислового зразка.

Технічні рішення, запропоновані у процесі проведення досліджень, захищені двома патентами України на корисну модель.

**Особистий внесок здобувача.** Здобувач самостійно виконав основні теоретичні і експериментальні дослідження за темою дисертації, здійснив планування експериментів, забезпечив математичну обробку отриманих результатів та проаналізував і узагальнив їх, запропонував технологічну схему та розробив лабораторні установки для формування гранул ОМД, дослідив технологічні режими, отримав регресійну модель процесу гранулювання ОМД на основі сапропелю та запропонував дані на проектування дослідного зразка засобу.

В опублікованих працях у співавторстві частка здобувача складає 60 – 75%, в них проведено аналіз перспективного напрямку виробництва ОМД на основі сапропелів методом кочення нагрітою поверхнею [1 – 3]; аналітичне визначення закономірності процесу передачі тепла від нагрітої поверхні до вологих пластичних тіл для надання їм твердості [5, 9], аналіз кінематичних, конструктивних і технологічних параметрів засобу формування гранул ОМД рухомою нагрітою поверхнею [4, 7, 8], експериментальні дослідження, обробка дослідних даних за допомогою ПК, узагальнення і розробка рекомендацій [10]; розроблено методику дослідження передачі тепла від нагрітої поверхні до шару ОМД товщиною в одну гранулу [6], встановлено ефективність запропонованого методу та проведення випробування дослідного зразка механізму формування гранул [11]. Одна стаття є одноосібною.

У технічних рішеннях, які розроблені на рівні винаходів [12, 13] частка кожного автора є рівноцінною.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи розглянуті й схвалені на щорічних НПК професорсько-викладацького складу Луцького НТУ (2008 – 2012 рр.); наукових семінарах кафедри сільськогосподарського машинобудування Луцького НТУ; II Міжнародній НПК “Інноваційні технології в АПК та лісовому комплексі” (м. Ковель 2-4 червня 2009 року); VII Міжнародній НПК “Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки” (м. Кіровоград 28-30 жовтня 2009 року, Кіровоградський НТУ); III Міжнародній НПК “Інноваційні технології в агропромисловому і лісовому комплексах та переробній галузі” (м. Луцьк, 2-3 червня 2011 року); Міжнародній НПК “Технічний прогрес в АПК (м. Харків, 24-25 березня 2011 року); VII Міжнародній НПК “Проблеми конструювання,

виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки” (м. Кіровоград, 3-4 листопада 2011 року, Кіровоградський НТУ); III Міжнародній НПК “Земля України – потенціал енергетичної та екологічної безпеки держави” (м. Вінниця, 2-4 квітня 2012 року).

Дисертаційна робота у повному обсязі була заслухана на розширеному науковому семінарі кафедр обладнання переробних виробництв і сільськогосподарського машинобудування ЛНТУ (м. Луцьк, 2012 року), Міжнародному науково-практичному форумі “Теоретичні основи і практичні аспекти використання ресурсощадних технологій для підвищення ефективності агропромислового виробництва і розвитку сільських територій” (м. Львів 18-21 вересня 2012 року, Львівський НАУ) та на XIII Міжнародній науковій конференції, присвяченій 112-й річниці від дня народження академіка Петра Василенка, “Сучасні проблеми землеробської механіки” (м. Вінниця, 2012 року).

**Публікації.** Основні дослідження дисертації опубліковано у 16 друкованих працях, з яких 13 статей у фахових наукових виданнях України. Результати досліджень захищено двома патентами України на корисну модель.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 139 найменувань та 4 додатків. Основна частина викладена на 158 сторінках, містить 64 рисунки та 15 таблиць.

#### Основний зміст роботи

**У вступі** подано загальну характеристику роботи, розкрито сутність і стан науково-прикладної задачі та її народногосподарське значення, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, встановлено наукове та практичне значення отриманих результатів, охарактеризовано об’єкт, предмет та методи досліджень.

**У першому розділі** наведено аналіз стану сучасних технологій гранулювання ОМС різних матеріалів. Вказано на особливості конструктивно-технологічних схем грануляторів, засобів формування гранул та наведено огляд наукових досліджень з даної проблеми.

Однією з актуальних задач сільськогосподарського виробництва є покращення родючості ґрунтів за рахунок локального внесення компонентів добрив, особливо нових видів, таких як ОМД у складі «органічна частина (сапропель) + НРК». Це дозволить знизити техногенне навантаження на ґрунти, покращуючи органічні, хімічні та біологічні їх властивості.

Проблемами внесення добрив займалися такі вчені, як Василенко П.М., Летошнев М.Н., Босой Е.С., Бакум М.В., Адамчук В.В., Войтюк Д.Г., Головчук А.Ф., Лінник М.К., Євтушенко В.С., Соколов В.М., Меєровський А.С., Бараннікова Є.В. та інші. Основна їх увага приділялась теоретичним та експериментальним дослідженням внесення добрив.

Але дослідженню процесів та засобів формування комплексних добрив, використання їх у сільськогосподарському виробництві, особливо ОМД достатньої уваги не приділялось. Тому основним завданням дисертаційної роботи було розроблення технології та засобу формування гранул ОМД на основі сапропелю природної вологості.

## СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Тарасюк В.В.* [Конструктивні особливості формування гранул при виробництві ОМД на основі сапропелю](#) / В.В. Тарасюк, В.Ф. Дідух, І.В. Тараймович // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». – Кіровоград, 2010. – Вип.№40 (частина II). – С.112-115. *Дисертанту належать аналіз та узагальнення результатів дослідження.*
2. *Глюшик І.М.* Технологія добування озерних сапропелів та виробництво ОМД на їх основі / І.М. Глюшик, В.В. Тарасюк, А.Л. Матчук // Міжвузівський збірник (за напрямком «Інженерна механіка») «Наукові нотатки» Луцьк, ЛНТУ, 2011. – Вип.34. – С. 107-110. *Дисертанту належать формулювання ідеї удосконалення технології.*
3. *Дідух В.Ф.* Дослідження процесу формування гранул органо-мінеральних добрив методом обкочування / В.Ф. Дідух, І.В. Тараймович, В.В. Тарасюк, Д.С. Русаков // Вісник Харківського технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. «Механізація сільськогосподарського виробництва» – Харків, 2011. – Т.1, № 107. – С. 387-394. *Дисертанту належать основні ідеї та формалізація даних.*
4. *Тарасюк В.В.* Розрахунок геометричних параметрів робочої поверхні засобу формування гранул органо-мінеральних добрив / В.В. Тарасюк, В.Ф. Дідух, І.В. Тараймович // Технологічні комплекси. Науковий журнал, Вип. 1 (3). – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2011. – С. 121-123. *Дисертанту належить теоретичне дослідження процесу та узагальнення результатів.*
5. *Тарасюк В.В.* Визначення інтенсивності зневоднення частинок ОМД на етапі формування гранул / В.В. Тарасюк, В.Ф. Дідух, І.В. Тараймович // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 21. – Том II. – Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2011. – С. 130-134. *Дисертанту належить теоретичне обґрунтування процесу та узагальнення результатів.*
6. *Тарасюк В.В.* Дослідження переносу теплоти від нагрітої поверхні до гранул ОМД кулястої форми / В.В. Тарасюк, В.Ф. Дідух // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». – Кіровоград, 2011. – Вип.№41 (частина I). – С.223-227. *Дисертанту належать аналіз та узагальнення результатів дослідження.*
7. *Тарасюк В.В.* Вплив властивостей частинок оmd і параметрів засобу формування гранул на якість виконання процесу / В.В. Тарасюк // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Вип. 10 т.2. (59). – Вінниця : Видавничий центр ВНАУ, 2012. – С. 84-88.
8. *Дідух В.Ф.* Дослідження руху частинки органо-мінеральних добрив по формуючій поверхні / В.Ф. Дідух, В.В. Тарасюк // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Вип. 10 т.2. (59). – Вінниця : Видавничий центр ВНАУ, 2012. – С. 84-88.
9. *Тарасюк В.В.* Встановлення раціонального режиму сушіння та часу зневоднення гранул ОМД на основі озерного сапропелю / В.В. Тарасюк, В.Ф. Дідух,

4. Засіб формування гранул ОМД кулястої форми методом кочення з одночасним зниженням їх вологості, відпрацьований на технологічність і дозволяє визначати передумови компоновальних схем технологічних ліній з виробництва ОМД із синхронізацією роботи окремих засобів та вдосконалювати конструкції робочих поверхонь, які взаємодіють з оброблюваним матеріалом.

5. Розроблено програму і методику проведення експериментальних досліджень з визначення закономірностей окремих параметрів коливної робочої поверхні; граничних режимів зневоднення сапропелю природної вологості, дво- і багатокомпонентних сумішей на основі сапропелю; виявлення впливу вмісту сапропелю у ОМС і ОМД на характер їх зневоднення; перевірки якісних параметрів сформованих гранул. При цьому початкова вологість озерного сапропелю складала  $83\pm 2\%$ .

6. Обґрунтовані склад та вміст двокомпонентних сумішей із озерного сапропелю та мінеральної частини НРК, вміст якого не повинен бути меншим 50%. Температура сушильного агента на стадії формування гранул ОМД кулястої форми  $70\pm 5^\circ\text{C}$ , а температура нагрітої поверхні – на стадії затвердіння гранул –  $110\pm 10^\circ\text{C}$ . Доведено ефективність впливу ретуру на збереження кулястої форми гранул в процесі їх формування. Визначено твердість сформованих гранул при максимальному їх зневодненні: для чистого сапропелю  $16 \text{ Н/мм}^2$ , для гранул ОМД –  $20 \text{ Н/мм}^2$ .

7. Отримані математичні моделі з визначення кількісних і якісних показників формування гранул ОМД на основі сапропелю природної вологості вказують, що досягти оптимальних значень кінцевої вологості гранул  $W_{k1} = 60,2 \%$ ; зусилля їх руйнування  $P=3,6 \text{ Н/мм}^2$ ; діаметра гранул  $5,8 \text{ мм}$  з відходом нетоварної фракції  $\eta=0,1$  можливо за умови, коли початкова вологість частинок довільної форми з ОМС становитиме  $W_n = 78 \%$ , температура робочої поверхні зони затвердіння гранул  $T_{нов} = 140^\circ\text{C}$ , загальна довжина робочої поверхні може бути в межах  $L = 1,87 - 2,5 \text{ м}$  з кутом нахилу до горизонталі  $\beta=2,0 - 5,0^\circ$ .

8. Доведено та експериментально підтверджено що для ізольованої від зовнішнього середовища робочої поверхні загальної довжини  $L = 2,5 \text{ м}$  варто передбачити дві зони: формуючу – довжиною до  $L_{\phi} = 1,0 \text{ м}$  та зону затвердіння гранул  $L_s = 1,5 \text{ м}$  з температурою їх поверхні  $T_{ноч} = 140^\circ\text{C}$ . Таке поєднання утворює ефект сушильної камери з температурою сушильного агента  $t_{ca} = 40\pm 5^\circ\text{C}$  та з використанням конвекційного і кондуктивного вологовидалення, що забезпечує зниження енерговитрат на отримання гранул ОМД кулястої форми.

9. Запропоновані методики інженерного розрахунку робочої поверхні засобу формування гранул методом кочення з одночасним зниженням їх вологості. Проведена агрономічна перевірка ефективності використання запропонованих добрив через енергію проростання, схожість та вплив на ріст редьки олійної. Рекомендовано технологічні та конструктивно-кінематичні параметри засобу з радіусом кривини робочої поверхні  $R = 0,8 \text{ м}$  для продуктивності  $250 \text{ кг/год}$ .

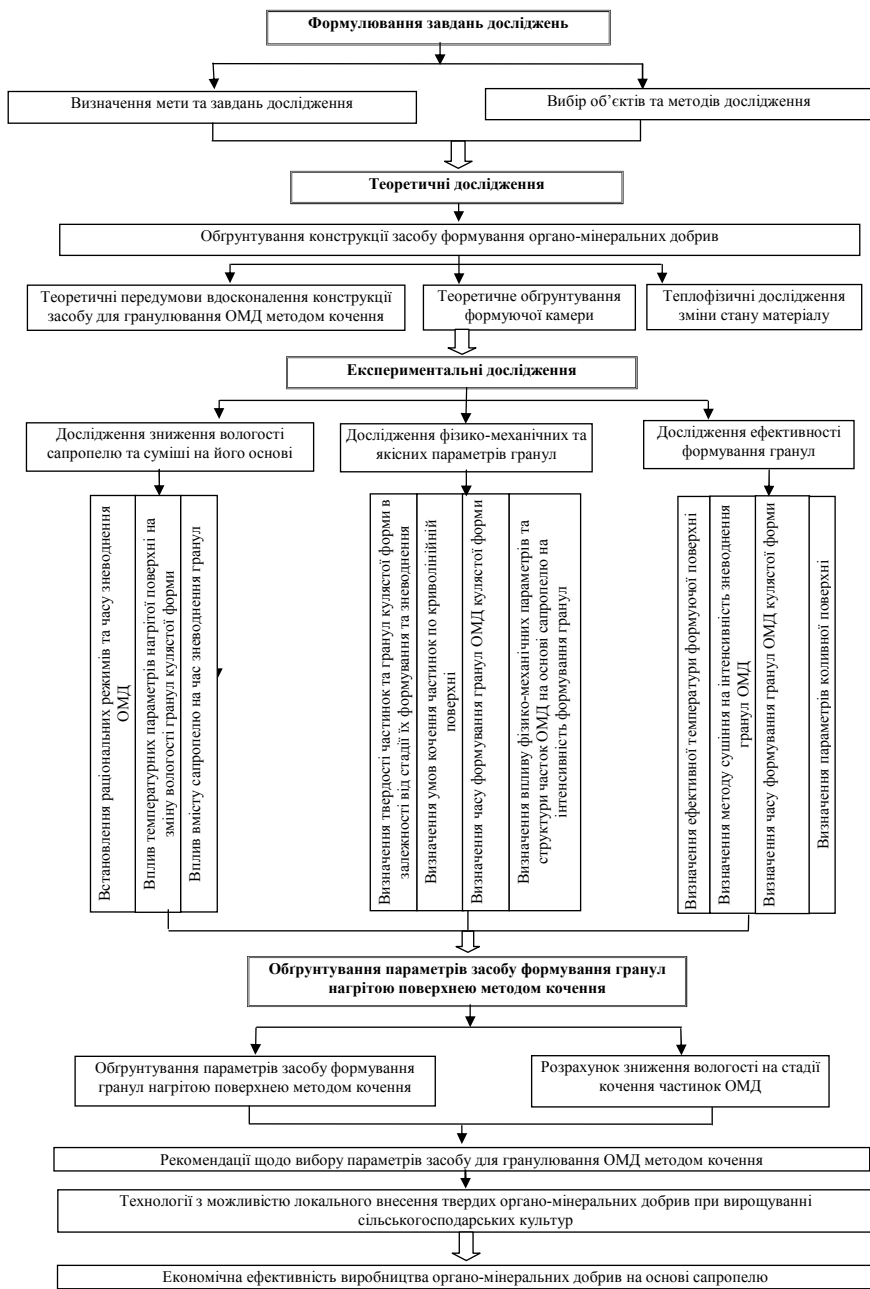
Існує ряд досліджень з гранулювання ОМД та використання їх при вирощуванні сільськогосподарських культур, де доводиться їх висока ефективність. Вагомий внесок в цих питаннях зробили відомі вчені Авдонін М.С., Лопотко М.З., Шевчук М.Й., Євдокімова Г.А., Вірясов Г.П., Ліштван Н.Н., Мартинсон А.Г., Рубінштейн А.Я., Смірнов А.В., Дідух В.Ф., Єрмоленко В.А., Курзо Б.В., Вилеба Б.Г., Сацюк В.В., Добровольська І.А., Ільїна Є.А., Титов Є.М., Хохлов В.Н. та інші.

Аналіз досліджень технологічного процесу гранулювання матеріалів вказує на його особливості при поєднанні компонентів з протилежними початковими вологостями. В такому випадку варто попередньо сформувати частинки довільної форми для подальшого перетворення у кулю. Для цього найбільше підходять робочі органи грануляторів, поверхні яких створюють умови кочення частинки. У відомих конструкціях така поверхня використовується не ефективно. Вона має велику металомісткість та значну енергомісткість процесу. Вихід якісного продукту становить менше 50%, що вимагає додаткової переробки та, відповідно, значних експлуатаційних затрат. На підставі викладеного поставлено мету та завдання досліджень.

У **другому розділі** наведено загальну схему проведення досліджень для вирішення поставлених у роботі завдань, яку наведено на рис.1 та теоретичні передумови обґрунтування технології та засобу для гранулювання ОМД на основі сапропелю методом кочення.

За останні роки науковцями створено ряд нових конструкцій засобів формування гранульованих добрив. Проте досягти бажаного результату для максимального виходу товарної фракції гранул ОМД необхідної якості та параметрів, яких вимагає подальше їх використання, не вдалося. Таке явище пояснюється особливостями поєднання в процесі формування двох або більше вхідних компонентів з різними властивостями. Для виявлення особливостей формування гранул розглядали їх зрізи під мікроскопом МБС-9 (рис. 2а).





а)



б)

Рис. 15. Загальний вигляд дослідно-експериментальної установки засобу формування гранул ОМД на основі сапропелю методом кочення та сформовані гранули.

Також наведено рекомендовані раціональні межі технологічних та конструктивно-кінематичних параметрів засобу формування гранул ОМД на основі озерного сапропелю природної вологості.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, яке полягає у підвищенні якості формування гранул ОМД на основі озерного сапропелю природного стану, зниженні енергомісткості процесу та металомісткості засобу виробництва гранул. Теоретично обґрунтовано технологічний процес перетворення частинок ОМД довільної форми у кулясту з одночасним зниженням їх вологості для забезпечення необхідної твердості при виробництві ОМД з визначенням теплофізичних, конструктивних і кінематичних параметрів і на основі цього запропоновано нову конструкцію засобу формування гранул ОМД методом кочення.

2. Вперше теоретично обґрунтовано технологічний процес виготовлення гранул ОМД на основі озерних сапропелів природного стану з врахуванням їх початкової вологості і визначенням її зміни при взаємодії з мінеральною частиною та температурним оточуючим середовищем у вигляді нагрітої робочої коливної поверхні і сушильним агентом. Обґрунтовано основні кінематичні параметри гранули кулястої форми, визначено коефіцієнт дифузії зневоднених сформованих гранул в межах  $a_m \approx 10,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{год}$ . Встановлені питомі енергетичні витрати в залежності від складу ОМД та кількості коливань робочої поверхні, які змінюються від 2,4 до 15,0 кДж.

3. Вперше розроблена динамічна модель руху частинок ОМД по формуючій поверхні з врахуванням зміни кутової частоти її коливань у межах 0,2–1,0 рад/с, коефіцієнта тертя 0,6–0,8, зміни радіуса криволінійності поверхні 0,2–1,2 м. Обґрунтовано час перебування частинки ОМД на робочій поверхні, достатнє значення якого 60 с. Отримані траєкторії переміщення частинок у радіальному та осьовому напрямках дозволяють вибрати раціональні геометричні та кінематичні параметри формуючої поверхні.

Рис. 1. Загальна схема проведення досліджень

Якщо формувати гранули методом обкочування, де присутній центр формування, то розміщення сапропелю (колоїду) поз. 3 матиме різний вигляд,



$d$  – діаметр гранул, мм;

$\eta$  – показник, що характеризує кількість пошкоджених гранул (нетоварна фракція);

$W_n$  – початкова вологість частинок довільної форми, %;

$T_{нов.}$  – температура нагрітої робочої поверхні установки, °С;

$L$  – довжина робочої поверхні установки, м;

$\beta$  – кут нахилу поверхні установки до горизонтальної осі, град.

Аналіз отриманих результатів показує, що оптимальні значення якісних параметрів гранул: кінцева вологість  $W_{к1} = 60,2\%$ , зусилля руйнування  $P = 3,6$  Н/мм<sup>2</sup>, діаметр гранул  $d = 5,8$  мм та коефіцієнт, що характеризує кількість пошкоджених гранул (нетоварну фракцію)  $\eta = 0,1$  будуть забезпечені за умови, коли початкова вологість частинок буде  $W_n = 78\%$ , температура формуючої поверхні  $T_{нов.} = 140$  °С, довжина поверхні  $L = 1,87 - 2,5$  м та кут її нахилу  $\beta = 2,0 - 5,0$  °.

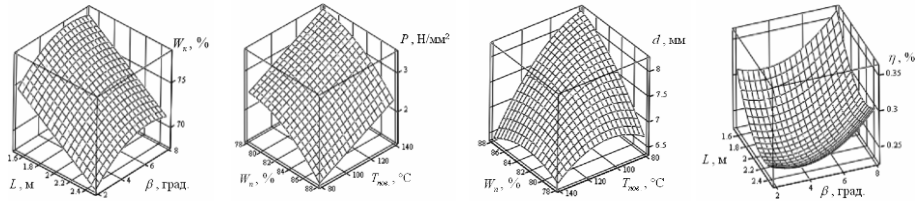


Рис. 14. Поверхні відгуку кінцевої вологості отриманих гранул, здатності зберігати форму під дією механічної дії (твердості гранул), кількості гранул відмінних від основного розміру, виходу товарної фракції (кількості несформованих гранул) в залежності від досліджуваних факторів  $W_n$ ,  $T_{нов.}$ ,  $L$ ,  $\beta$ .

У п'ятому розділі подані методики інженерного розрахунку робочої поверхні засобу формування гранул ОМД на основі сапропелю природної вологості методом кочення та зниження вологості на стадії обкочування частинок довільної форми, що дозволило розрахувати визначальні параметри вказаного засобу відповідно до заданої продуктивності.

Проведено перевірку агрономічної ефективності використання запропонованих ОМД у складі сапропелю + НРК через енергію проростання і схожість редьки олійної. Результати досліджень вказують на перевагу їх використання перед органічним сапропелем у чистому вигляді, зневодненого методом сушіння підвищеними температурами.

відповідно до вибраної мінеральної частини. Проте загальна структура гранули буде незмінною.

При формуванні гранул методами обкочування або кочення, між частинками компонентів можуть виникати капілярні та поверхнево-активні сили; адгезійні сили; сили притягання та сили, що виникають за рахунок хімічних реакцій і фізичних явищ. З врахуванням механізму утворення гранул методом обкочування, форми та їх структури, запропоновано ідеалізовану гранулу у сферичному вигляді з неоднорідною по об'єму складною структурою (рис. 2б).

В даній моделі гранули ОМД на основі сапропелю прісноводних озер необхідно виділити міжфазний (адгезійний) шар, який сполучає всі компоненти ОМД, в залежності від їх виду, походження та процентного співвідношення і має прямий вплив на властивості гранул ОМД. Такий шар, в основному, залежить від початкових значень властивостей органічної частини.

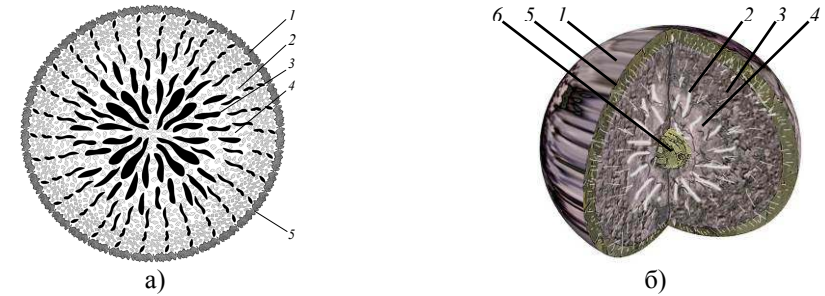


Рис. 2. Модель гранули при збільшенні у 70 разів (а) та її ідеалізована форма (б) утворена методом кочення: 1 – органо-мінеральна матриця; 2 – наповнювач (мінеральні добрива); 3 – сапропель (колоїд); 4 – міжфазний (адгезійний) шар; 5 – мікропори (повітряні пустоти); 6 – центр формування гранули.

Процес виготовлення ОМД енергомісткий та складний. Він вимагає великої кількості допоміжних операцій: дозування, змішування, сушіння, сепарації гранул. Тому, при дослідженні засобів гранулювання, зусилля необхідно спрямувати на пошук шляхів зниження металомісткості, зменшення енергетичних витрат на виготовлення добрив.

Якщо врахувати, що кінцева вологість гранул з дотриманням технічних вимог має знизитись до 10 % з розміром гранул 4 – 6 мм, то запропонований технологічний процес отримання гранул ОМД на основі сапропелю матиме наступний вигляд (рис. 3).

При цьому коливна поверхня 1, встановлюється під кутом  $\beta$  до горизонталі, а охолоджуючо-сепаруючий барабан 2 – горизонтально.

Для зменшення металомісткості технологічної лінії коливна робоча поверхня передбачає нагрівний елемент на стадії затвердіння гранул, що забезпечує зниження енергоємності процесу їх виробництва. Технологічний процес формування гранул відбувається наступним чином. Попередньо підготовлені частинки ОМС різної форми та маси подаються на нагріту коливну поверхню 1, що ізольована від навколишнього середовища. Зміна кута нахилу  $\beta$  дозволяє регулювати час знаходження гранул на поверхні. Під дією сили тяжіння та інерційних сил, що

виникають внаслідок коливання поверхні 1, частинки ОМД переміщуються у радіальному та осьовому напрямках, змінюючи свою форму на кульки довільного діаметру та набирають необхідної твердості за рахунок втрати вологи. Сформовані гранули потрапляють в охолоджуючо-сепаруючий барабан 2, де відбувається їх охолодження та розділення на товарну та дрібну фракції, остання з яких направляється на повторну переробку.

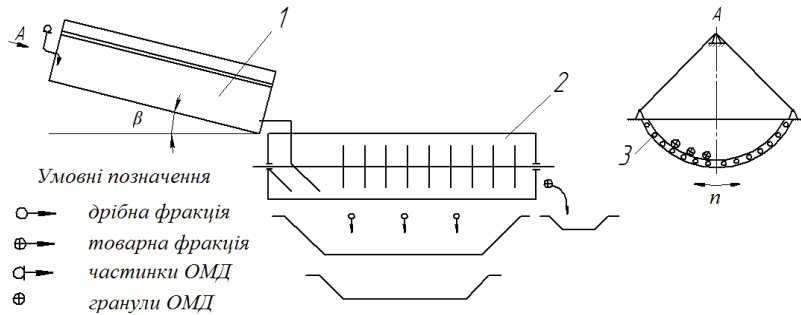


Рис. 3. Запропонована схема технологічної лінії формування гранул ОМД на основі сапропелю: 1 – коливна поверхня; 2 – охолоджуючо-сепаруючий барабан; 3 – нагрівальний елемент

Тривалість перебування гранул на нагрітій поверхні залежить від частоти та амплітуди коливань  $A$ , а кут нахилу  $\beta$  робочої поверхні регулюється пристроєм, вмонтованим у корпус засобу формування гранул.

Встановлені кінематичні параметри кулі діаметром  $d=0,01\text{ м}$  для робочої поверхні, яка має форму частини кола радіусом  $R_{нов.}=0,8\text{ м}$ , з врахуванням зміни її положення від значення, коли вона відхилена на максимальний кут та при його нульовому значенні.

Використавши закон збереження енергії при переміщенні кулеподібних тіл по криволінійних поверхнях запишемо рівняння:

$$\frac{E_0}{m} = \frac{r^2 + \rho^2}{2} \theta^2 - gy_p + rg \cos \theta = \frac{r^2 + \rho^2}{2} \theta^2 - gR \cos \theta + rg \cos \theta \quad (1)$$

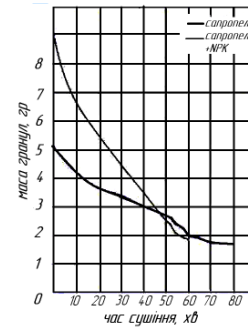
$$\dot{\theta} = \frac{\dot{S}}{r} + \dot{\theta} = \frac{R}{r} \frac{d}{dt} \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) + \dot{\theta} = \frac{R-r}{r} \dot{\theta} \quad (2)$$

При  $R=0,8\text{ м}$ ,  $r=0,01\text{ м}$ ,  $V_0=0$ ,  $\theta=0$ , максимальна швидкість та прискорення, у найнижчій точці криволінійної поверхні, кулеподібної частинки будуть рівними:

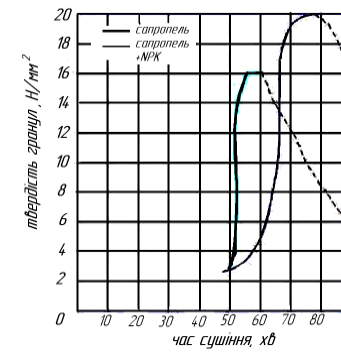
$$\dot{\phi} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (0,8 - 0,01)}{0,0001 + 0,2294}} \cdot 1 = 8,218 \text{ рад/с}$$

$$\ddot{\phi} = \frac{0,01 \cdot 9,81}{0,0001 + 0,2294} \cdot \theta = 0$$

Швидкість центра мас кулеподібної частини та проекції її вектора на координатні вісі при цьому будуть рівні, за умови коли  $\theta=0$ :



а)



б)

Рис. 13. Залежність зміни твердості та маси гранул ОМД від часу нагрівання нагрітою поверхнею: а) зміна маси гранул в залежності від вмісту сапропелю; б) залежність зусилля руйнування гранул від часу їх сушіння.

Графічна інтерпретація зміни маси з часом під дією нагрітої поверхні вказує на її інтенсивне зменшення протягом перших 50 хв. Таке явище можна пояснити кінетикою сушіння капілярно-пористих колоїдних тіл у період постійної швидкості сушіння, у якому відбувається вивільнення вільної вологи через макрокапіляри у сапропелі. Варто звернути увагу також, що гранули сформовані із чистого сапропелю менш стійкі до навантажень, ніж гранули у склад яких входить мінеральна частина у межах 5–7 Н/мм<sup>2</sup>.

Визначення кількісних та якісних показників (кінцева вологість отриманих гранул, здатність зберігати форму під дією механічної дії (твердість гранул), кількість гранул відмінних від основного розміру, вихід товарної фракції (кількість несформованих гранул) процесу формування гранул ОМД на основі озерного сапропелю природної вологості здійснювали за допомогою багатофакторного експерименту.

Обробка даних результатів чотирифакторного експерименту за тривірневим планом другого порядку дозволила отримати наступні рівняння регресії з факторами у натуральному вигляді:

- кінцева вологість гранул:  $W_k = -0,0008T_{нов.}^2 - 0,189\beta^2 + 0,915W_n + 0,095T_{нов.} - 6,672L + 2,433\beta + 3,788 \quad (11)$

- тиск (питоме зусилля) руйнування гранул:  $P = -0,01W_n^2 - 1,344L^2 - 0,073\beta^2 + 1,205W_n + 0,035T_{нов.} - 4,58L - 2,76\beta + 0,17W_nL + 0,032W_n\beta - 0,026T_{нов.}L + 0,007T_{нов.}\beta - 34,839 \quad (12)$

- діаметр гранул:  $d = -0,009W_n^2 - 0,0004T_{нов.}^2 - 0,948L^2 + 1,897W_n + 0,32T_{нов.} + 3,436L + 0,091\beta - 0,003W_nT_{нов.} - 94,371 \quad (13)$

- показник, що характеризує кількість пошкоджених гранул (нетоварна фракція):  $\eta = 0,0007W_n^2 - 2 \cdot 10^{-5}T_{нов.}^2 + 0,152L^2 + 0,003\beta^2 - 0,121W_n + 0,003T_{нов.} - 1,33L - 0,021\beta + 0,008W_nL + 6,109 \quad (14)$

де  $W_k$  – кінцева вологість гранул, %;

$P$  – тиск (питоме зусилля) руйнування гранул, Н/мм<sup>2</sup>;

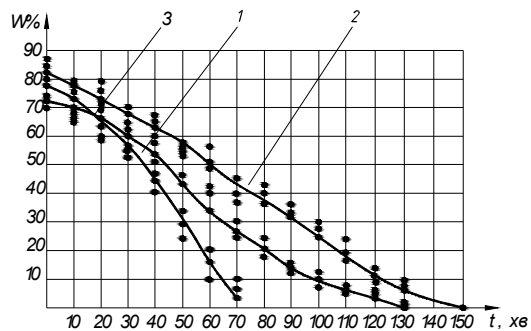


Рис. 11. Криві сушіння чистого озерного сапропелю при температурі сушильного агента 100 °С: 1 – сапропель, сформований у гранули; 2 – сапропель природного стану; 3 – сапропель, сформований у гранули ОМД з використанням ретуру.

З іншої сторони, різниця між зневодненням гранул із чистого сапропелю та гранулами, обкоченими у ретурі незначна і знаходиться в межах похибки досліду. Проте, як показали дослідження процесу обкочування гранул у ретурі, час перетворення їх із частинок довільної форми у кулясту зменшується до 35 – 40 с та забезпечує більшу їх кулястість (рис.12).

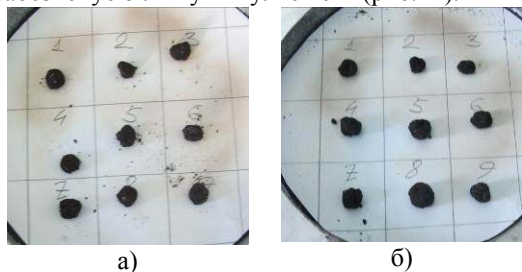


Рис. 12. Результати формування та зневоднення гранул: а) – гранули із чистого сапропелю; б) – гранули ОМД, обкочені у ретурі.

Даний результат підтверджує гіпотезу про необхідність двохстадійного зневоднення гранул. Для зниження вологості до нормованого значення, яке забезпечує максимальну твердість. Вибір методу сушіння сформованих гранул має встановлюватись додатково.

Згідно розробленої методики, кут тертя кочення для гранул із сапропелю початковою вологістю 83% знаходиться у межах 17 – 20° та кут кочення для ОМД на основі сапропелю вологістю 83% з насиченням НРК у відношенні 16-16-16 – 20 – 30°, що дозволяє зробити висновок про необхідність вибору кута дотичної до криволінійної поверхні не менше 30° при відхиленні поверхні в початковому положенні на 45°.

Отримані дані досліджень гранул ОМД на твердість в залежності від часу сушіння (затвердіння) дозволяють прослідкувати за зміною маси гранул ОМД, їх геометричних параметрів та встановити максимальне зусилля під дією якого гранула зруйнується. Воно становить не більше 25 Н/мм<sup>2</sup>.

Існують також відмінності зміни маси гранул із чистого сапропелю вологістю 83% та гранул ОМД на основі сапропелю даної вологості і компонентів НРК із вмістом 16-16-16. За час сушіння 60 – 80 хв., гранули масою 5 – 10 г зменшуються у розмірах у 2 – 3 рази. Відповідно, у тих же значеннях змінюється і їх маса для обох варіантів.

$$V = V_x = 0,01 \cdot 8,218 = 0,082 \text{ м/с}, \quad V_y = 0.$$

Складність процесу формування гранул кулястої форми полягає у зміні геометричної форми частинки, яка рухається по криволінійній поверхні (рис. 4а), розміщеній під кутом до горизонту (рис. 4б). Встановлення законів її руху даною поверхнею дозволить визначити основні кінематичні параметри засобу гранулювання ОМД на основі сапропелів для забезпечення максимального виходу їх товарної фракції.

При проведенні досліджень зробимо наступні допущення: частинка є сталою масою, не змінює її протягом всього шляху при переміщенні, та не відривається від поверхні; зміна геометричної форми не впливає на траєкторію руху частинки; липкість поверхневого шару частинки не змінюється та не впливає на її прискорення при зміні напрямку руху; досліджувана траєкторія не виходить за межі допустимих значень вибраних геометричних параметрів поверхні.

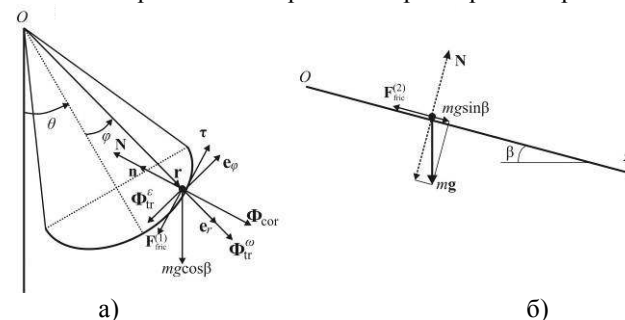


Рис. 4. Сили, які діють на матеріальну частинку при переміщенні криволінійною поверхнею: а) вигляд криволінійної поверхні спереду; б) вигляд криволінійної поверхні збоку.

Оскільки траєкторія частинки, задана в полярній системі координат, то введено у розгляд систему одиничних ортогональних векторів  $e_r$  та  $e_\varphi$ , спрямованих відповідно вздовж радіуса-вектора частинки та перпендикулярно до нього у напрямі відліку полярного кута  $\varphi$ .

Додатково введено орти натуральної системи координат: нормаль  $n$ , спрямовану у напрямі найбільшої увігнутості траєкторії та дотичну  $\tau$ . Ці вектори пов'язані із векторами  $e_r$  та  $e_\varphi$  залежностями:

$$\tau = \frac{(r'_\varphi(\varphi) \cdot e_r + r(\varphi) \cdot e_\varphi)}{J(\varphi)}; \quad n = \frac{(-r(\varphi) \cdot e_r + r'_\varphi(\varphi) \cdot e_\varphi)}{J(\varphi)}. \quad (3)$$

де  $J(\varphi) = \sqrt{[r(\varphi)]^2 + [r'_\varphi(\varphi)]^2}$  – Якобіан; штрихами позначено похідні за змінними,

що розташовані в індексі, тобто  $r'_\varphi = \frac{dr}{d\varphi}$ .

Після перетворень отримано систему диференціальних рівнянь відносного руху матеріальної частинки в неінерційній системі координат  $Or\varphi z$ :

$$\ddot{\varphi}J(\varphi) + (\dot{\varphi})^2 \alpha(\varphi) = -f\tilde{N} \frac{\dot{\varphi}J(\varphi)}{\sqrt{(\dot{\varphi}J(\varphi))^2 + \dot{z}^2}} + \frac{\dot{\theta}^2 r(\varphi) r'_\varphi(\varphi) - \ddot{\theta} (r(\varphi))^2}{J(\varphi)} + \quad (4)$$

$$+ \frac{g \cos \beta}{J(\varphi)} [r'_\varphi(\varphi) \cos(\theta + \varphi) - r(\varphi) \sin(\theta + \varphi)],$$

$$\ddot{z} = g \sin \beta - f\tilde{N} \frac{\dot{z}}{\sqrt{(\dot{\varphi}J(\varphi))^2 + \dot{z}^2}}.$$

$$\text{де } \tilde{N} = \frac{N}{m} = \frac{(\dot{\varphi}J(\varphi))^2}{\rho(\varphi)} + \frac{[\dot{\theta}r(\varphi)]^2}{J(\varphi)} + \frac{\ddot{\theta}r(\varphi)r'_\varphi(\varphi)}{J(\varphi)} + 2\dot{\theta}J(\varphi)\dot{\varphi} + \quad (5)$$

$$+ \frac{g \cos \beta}{J(\varphi)} [r(\varphi) \cos(\theta + \varphi) + r'_\varphi(\varphi) \sin(\theta + \varphi)].$$

Рівняння (5) необхідно розв'язувати з урахуванням умови  $\tilde{N} \geq 0$ , тобто того, що матеріальна частинка не відривається від заданої циліндричної поверхні.

Диференціальні рівняння (4) є нелінійними диференціальними рівняннями зі змінними коефіцієнтами, тому для їх розв'язування використовуємо числові методи. Оптимальним є розв'язування задачі методом Рунге-Куты 4 порядку.

Розробивши відповідну програму та врахувавши попередні експериментальні дослідження з визначення геометричних параметрів криволінійної поверхні, де базовими параметрами стали:  $R$  – радіус кривини поверхні,  $R = 0,8$  м;  $d$  – відстань від середини поверхні до осі її обертання,  $d = 0,6$  м;  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання,  $f = 0,6 \dots 0,8$  було проведено розрахунки за формулами (5) та отримано ряд залежностей (рис. 5).

На час знаходження гранули ОМД на коливній поверхні суттєвий вплив матиме кут її нахилу до горизонталі. Його зміна в межах  $\beta = \pi/4 \dots \pi/20$  дозволила

встановити час формування гранули при її перетворенні з частинки довільної форми у кулясту, який складає в межах 60 с.

Рациональним значенням кута нахилу робочої поверхні до горизонталі має бути значення в межах  $\beta = \pi/8 \dots \pi/20$ . Максимальне використання корисної площі

поверхні кочення залежатиме також і від частоти коливання даної поверхні. При проведенні теоретичних розрахунків значення частоти коливань поверхні встановлено у межах 0,2-1,0 рад/с.

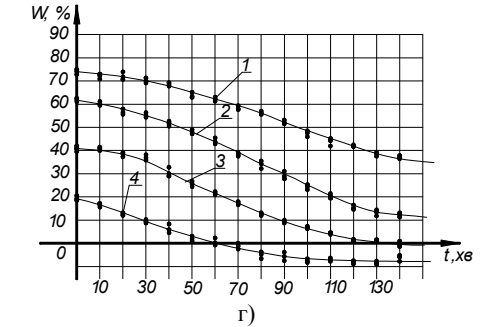
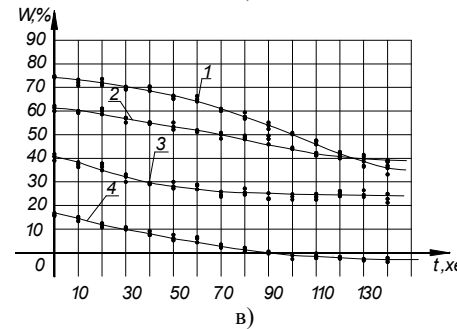
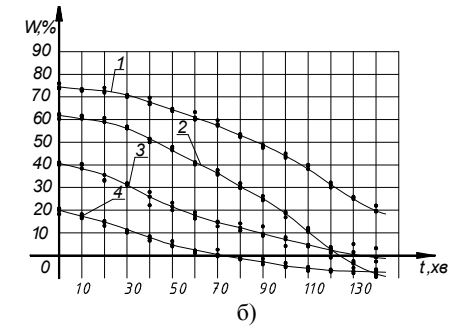
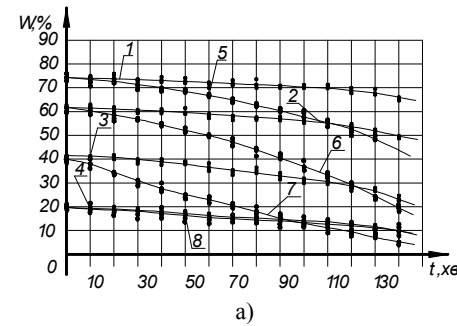


Рис. 10. Залежності зміни вологості ОМД під дією температури:

а) сапропель +N (1–4 при  $t=70 \pm 5^\circ\text{C}$ ; 5–8 при  $t=110 \pm 10^\circ\text{C}$ );

б) сапропель +P; в) сапропель +K; г) сапропель +NPK.

1, 5 – сапропель (90%) + мінеральна складова (10%);

2, 6 – сапропель (75%) + мінеральна складова (25%);

3, 7 – сапропель (50%) + мінеральна складова (50%);

4, 8 – сапропель (25%) + мінеральна складова (75%).

Найбільш перспективними для використання в агропромисловому комплексі слід вважати багатоконпонентні ОМД (сапропель+NPK). Проте в окремих випадках, при чітких розрахунках діючої речовини NPK являє інтерес саме до формування гранул із двокомпонентних сумішей кулястої форми.

Порівняльний аналіз кривих на рис. 10 показує на рівномірно однакове з часом виділення вологи із сумішей незалежно від відсоткового вмісту мінеральної частини. Проте формування гранул для даного випадку варто проводити при вмісті сапропелю не менше 75% від загальної маси ОМД (криві 1 та 2).

Особливістю отриманих результатів з формування гранул шляхом перетворення частинок довільної форми у кулясту з використанням криволінійної поверхні (рис. 11) є встановлення різниці в інтенсивності зневоднення сапропелю природної вологості (крива 1) та сформованих у гранули (крива 2 і 3). Збільшення часу у два рази при зневодненні сапропелю природної вологості та в гранулах вказує на поверхневе ущільнення гранул в процесі обкочування та закриття капілярів з рідиною.



основі озерного сапропелю методом кочення. Встановленні закономірності його поведінки під дією температури дозволили вибрати раціональні температурні параметри робочої поверхні засобу формування гранул ОМД. Результати дослідження представлені у вигляді кривих сушіння та швидкості його сушіння в залежності від температури сушильного агенту 100° С, 150° С та 200° С (рис. 9).

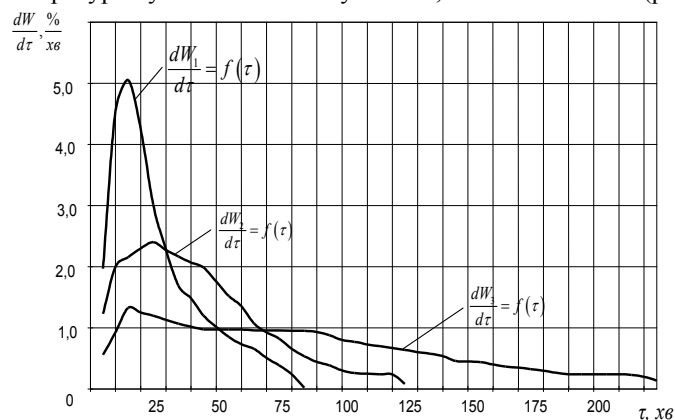


Рис. 9. Криві швидкості сушіння сапропелю при температурі сушильного агенту 100° С, 150°С та 200°С.

Аналіз даних графіків вказує на типову поведінку сапропелю, як для багатьох інших вологих матеріалів. Тому, при зневодненні озерного сапропелю з точки зору кінетики процесу характерні три періоди: прогріву, постійної та падаючої швидкості сушіння, що відповідає більшості колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

Виявленні закономірності зниження вологості у двокомпонентних сумішах шляхом побудови кривих (рис. 10) дозволили визначитися із часом формування гранул з використанням їх кочення по нагрітій поверхні. Така поверхня створює певне температурне середовище і, в кінцевому випадку, забезпечує твердість гранул для виконання подальших технологічних операцій з їх виробництва.

Як видно із представлених результатів, вид мінеральної частини має суттєвий вплив на процес зневоднення суміші, що пояснюється хімічними перетвореннями мінеральної частини під дією температури. Має він також особливості і при зміні його відсоткового вмісту. Якщо для калійних та фосфорних добрив можливі три варіанти їх вмісту в сумішах: сапропель 90%, 75% та 50%, то для азотних добрив можливий лише вміст від 25% і менше. Отже, залежно від типу мінеральних добрив можна регулювати вміст діючої речовини при виробництві двокомпонентних органо-мінеральних добрив.

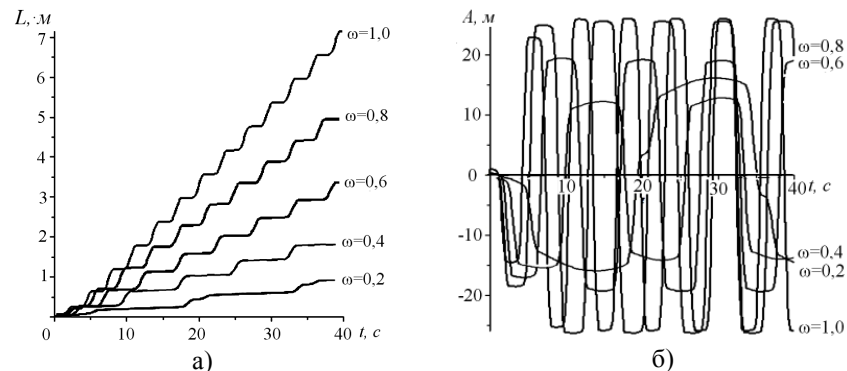


Рис. 5. Траєкторії переміщення частинок в осьовому (а) та радіальному (б) напрямках

Розглянуто процес зневоднення шару частинок ОМД довільної форми товщиною в одну гранулу за наступних допущень: частинки ОМД за розмірами не відрізняються між собою у межах маси, з якої будуть отримані гранули з середнім діаметром 4-6 мм після зневоднення їх до нормованої вологості; температура та вологовміст сушильного агента у зоні взаємодії з частинками є величина стала; вологоперенесення відбувається лише між сушильним агентом та частинками; час знаходження будь-якої частинки із розглядуваного шару у зоні дії сушильного агента величина постійна і обумовлюється часом перетворення частинки довільної форми у частинку за формою, що наближається до форми кулі (рис. 6).

За вказаних допущень, інтенсивність видалення вологи визначатиметься:

$$J_n = \frac{1}{r} \cdot \left[ \alpha \cdot \left( \frac{\frac{1}{2} \cdot Ki_m \cdot \varepsilon \cdot Ko \cdot Lu}{t_n - t_o} \right) + c \cdot \rho_o \cdot R_v \cdot \frac{dt}{d\tau} \right] \quad (7)$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $r$  – питома теплота пароутворення води, Дж/кг;  $t_{ca}$ ,  $t_n$  – відповідно температура сушильного агента та температура на поверхні частинки;  $J_n$  – інтенсивність видалення вологи з поверхневих шарів частинок, кг/м<sup>2</sup>·год;  $c$  – питома теплоємність води, Дж/(кг·К);  $R_v$  – площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>;  $\rho_o$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $\frac{dt}{d\tau}$  – зміна температури на поверхні теплообміну;  $Ki_m$  – масообмінний критерій Кірпічова;  $Lu$  – критерій інерційності Ликова;  $Ko$  – критерій Косовича;  $\varepsilon$  – коефіцієнт фазового перетворення.

Аналіз формули (7) показує також, що із зростанням інтенсивності зростатиме і критерій Кірпічова, який характеризує співвідношення між зовнішнім масообміном та внутрішнім перенесенням маси. А це вказує на зростання різниці температур поверхневих і внутрішніх шарів окремих часток, що сприяє виникненню градієнту температур. Тому, на етапі перетворення частинок довільної форми у кулясту для

часткового зневоднення ОМД необхідно застосовувати «м'які» режими сушіння методом природної конвекції.

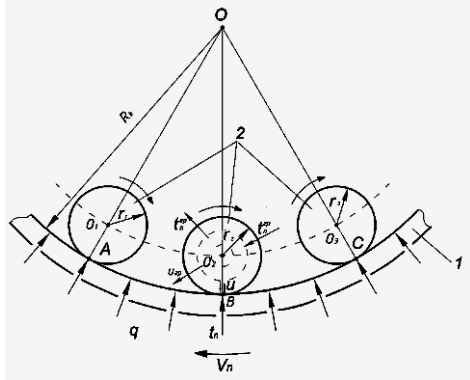


Рис. 6. Схема до розрахунку перенесення теплоти від нагрітої криволінійної поверхні до сформованої гранули кулястої форми:  
1 – робоча поверхня;  
2 – гранула.

Процес сушіння за даних умов характеризує період постійної швидкості, тому масообмінний критерій Кірпічова визначено як:

$$Ki_m = 2 \frac{u_u - u_n}{u_o - u_p}, \quad (8)$$

де індекси при вологовмістах  $u$  відповідно:  $u, n, o, p$  – центр, поверхня, початкове та рівноважне значення.

Отримавши значення Кірпічова для гранули ОМД на основі органічного сапропелю, визначено коефіцієнт дифузії вологи з гранул ОМД, при їх конвективному сушінні на «м'яких» режимах за формулою:

$$\alpha_m = \frac{R \cdot R_m}{Ki_m \cdot W_o} \cdot \frac{dW}{d\tau}. \quad (9)$$

Підставивши значення, отримано:  $\alpha_m \approx 10,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{год}$ .

Дане значення знаходиться у межах значень коефіцієнта дифузії глини при її зневодненні на низькотемпературних режимах, що підтверджує висновки про утворення щільної органо-мінеральної матриці навколо гранули ОМД у випадку використання методу кочення.

Проаналізовано явище передачі внутрішньої вологи гранули на поверхню у зоні її контакту з нагрітим елементом та запропоновано формулу (10), яка дає можливість визначити сумарну кількість теплоти, і, відповідно, встановити питомі енергетичні затрати (рис. 7) при отриманні гранул ОМД кулястої форми на основі сапропелю природної вологості:

$$Q_{заг.} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{\lambda_{сп.} c_{сп.} \rho_{сп.} \tau}{\pi}} \frac{\delta_s}{(u_n - u_k) - \delta_s u_n} \frac{(t_{н.н.} - t_{н.сп.})}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_{сп.} c_{сп.} \rho_{сп.}}{\lambda_{н.н.} c_{н.н.} \rho_{н.н.}}}, \quad (10)$$

де:  $\delta_s = (S_n - S_k)/S_n$  – відносна усадка гранули кулястої форми при зміні її вологовмісту від початкового  $u_n$  до кінцевого  $u_k$  значення;  $\lambda_{сп.}$  – коефіцієнт теплопровідності вологої гранули, (кДж/(м·К));  $\lambda_{н.н.}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу нагрівальної поверхні, (кДж/(м·К));  $c_{сп.}, c_{н.н.}$  – відповідно питомі

теплоємності вологої гранули та матеріалу нагрівальної поверхні, (Дж/кг·°С);  $t_{н.сп.}, t_{н.н.}$  – температури на поверхні гранули та нагрівальної поверхні, °С;  $a_{сп.}$  – коефіцієнт температуропровідності вологої гранули;  $\rho_{сп.}, \rho_{н.н.}$  – відповідно щільність гранули та густина матеріалу нагрівальної поверхні, кг/м<sup>3</sup>.

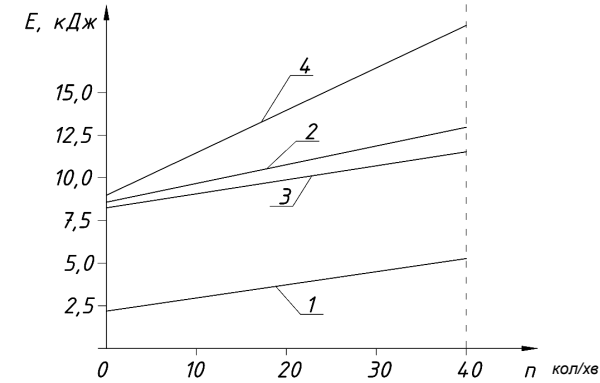


Рис. 7. Питомі енергетичні витрати на зневоднення гранули в залежності від кількості коливань робочої поверхні:  
1 – Сапропель + NPK;  
2 – Сапропель + К;  
3 – Сапропель + Р;  
4 – Сапропель + N.

У третьому розділі викладено загальну методуку, основні методи досліджень та представлені прилади, обладнання й лабораторні установки для моделювання окремих операцій запропонованого методу, які використовувалися в процесі проведення дослідів.

Для проведення запланованих експериментальних досліджень розроблено і виготовлено нестандартні лабораторні установки для оптимізації, перевірки, встановлення параметрів не тільки процесу гранулювання, але й визначення конструктивних параметрів запропонованого гранулятора (рис. 8).



Рис. 8. Лабораторні установки для моделювання окремих операцій процесу гранулювання методом кочення

Запропоновані методики: визначення раціональних режимів та часу зневоднення озерного сапропелю та гранул ОМД на його основі; ефективності впливу ретуру на процес формування та зневоднення гранул кулястої форми; температурних параметрів нагрітої поверхні та вплив її на зміну вологості гранул кулястої форми; твердості частинок та гранул кулястої форми в залежності від стадії їх формування та зневоднення; методики моделювання процесу кочення частинок ОМД коливною поверхнею; визначення впливу властивостей частинок ОМД і параметрів засобу формування гранул на якість виконання процесу та встановлення ефективності використання ОМД в сільськогосподарському виробництві.

У четвертому розділі викладено результати експериментальних досліджень та виявленні залежності параметрів технологічного процесу гранулювання ОМД на