



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
НТУУ "КПІ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

**Я.М. Корнієнко, Р.В.Сачок**

**ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ  
ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ МІНЕРАЛЬНО-ГУМІНОВИХ ТВЕРДИХ  
КОМПОЗИТІВ В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ**

**МОНОГРАФІЯ**

КИЇВ – 2018

УДК 628.5:66.002.9

ББК 32.965н73

X89

*Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(Протокол №7 від «27» червня 2018 р.)*

Рецензенти: *В.В. Собченко* (Інститут газу НАН України)

*Д.М. Корінчук* (ІТТФ НАН України)

Редактор: *А. Р. Степанюк*

**Корнієнко Я. М., Сачок Р. В.**

X89 Особливості моделювання процесів гранулоутворення мінерально-гумінових твердих композитів в псевдозрідженому шарі: Монографія [Електронне видання]. 69 с.: іл.

ISBN 000-00-000-0

Викладено основні підходи до дослідження процесів гранулоутворення багатошарових композитів у псевдозрідженому шарі.

Для студентів та фахівців спеціальності Галузеве машинобудування.

**УДК 628.5:66.002.9**

**ББК 32.965н73**

ISBN 000-00-000-0

© Я.М. Корнієнко, Р.В. Сачок

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
1 СТВОРЕННЯ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ГУМІНОВИХ ТВЕРДИХ КОМПОЗИТІВ.....	6
1.1 Засади створення органо-мінеральних композитів.....	6
1.2 Обґрунтування створення нових мінерально-гумінових композитів.....	7
1.3 Світова практика виробництва гранульованих добрив при зневодненні рідких систем.....	14
1.4 Моделювання процесу утворення гуміново-мінеральних композитів у псевдозрідженому шарі.....	19
2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ МІНЕРАЛЬНО-ГУМІНОВИХ ТВЕРДИХ КОМПОЗИТІВ.....	26
2.1 Фізичне моделювання процесу утворення твердих композитів з рідких систем.....	26
2.2 Математична модель утворення багат шарових гуміново- мінеральних добрив .....	31
2.3 Оцінка ефективності процесу.....	37
3 ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ МІНЕРАЛЬНО-ГУМІНОВИХ КОМПОЗИТІВ В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ.....	41
3.1 Застосування нечіткої логіки для моделювання процесу.....	41
3.2 Узагальнена модель утворення мінерально-гумінових добрив.....	60
Перелік посилань.....	67

## ВСТУП

Для забезпечення творчого підходу до технічних проблем фахівцями всіх ОКР – "бакалавр", "спеціаліст", "магістр" та PhD інженерного спрямування, зокрема фахівців, які готуються за спеціальністю "Обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів", їм необхідно за результатами аналізу існуючих способів реалізації процесу та особливостей апаратного оформлення визначити принципи і методи усунення існуючих недоліків та провести реінженірінг з метою енергозбереження та підвищення екобезпеки.

Набуття таких компетенцій формується у студентів в процесі вивчення кредитних модулів "Основні процеси, апарати та машини галузі – 2. Механічні та гідромеханічні процеси" і "Основні процеси, апарати та машини галузі – 3. Масообмінні процеси".

В монографії за результатами наукових досліджень наведено приклади застосування техніки псевдозрідження для зневоднення і грануляції розчинів сульфату амонію та запропоновано спосіб реалізації з суміщенням декількох технологічних стадій в одному апараті з одержанням мінерально-гумінових гранульованих добрив з новими унікальними характеристиками.

Сформульована фізична модель утворення твердих органо-мінеральних композитів з пошаровою структурою, хімічний склад яких визначається агро-кліматичними умовами їх застосування.

Запропоновані математичні моделі багатофакторних процесів, які описують процес гранулоутворення з рідких гетерогенних систем.

Таким чином, в монографії наведено приклад вирішення проблеми утилізації промислових відходів через застосування нового енергоефективного способу одержання органо-мінеральних добрив, необхідного для збереження родючості ґрунтів.

Запропоновано нові критерії оцінки процесу, які набувають максимальних значень при вдалому поєднанні процесів тепло- масообміну при взаємодії газового теплоносія з твердими частинками.

Монографія дозволить студентам ОКР "бакалавр" краще зрозуміти сутність та умови проведення процесів гранулоутворення твердих композитів. Монографія допоможе студентам ОКР "спеціаліст", "магістр" та PhD при створенні нових технічних рішень і методів проведення аналітичних та експериментальних досліджень.

# 1 СТВОРЕННЯ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ГУМІНОВИХ ТВЕРДИХ КОМПОЗИТІВ

## 1.1 Засади створення органо-мінеральних композитів

За оцінками [1] в середньому для всіх сільськогосподарських культур коефіцієнт використання традиційних добрив становить: азотних – 50-60%, фосфорних – 10-25%, калійних – 50-60%. Це викликано тим, що солі або розчини солей надзвичайно швидко переміщуються в ґрунті і виносяться з нього.

При традиційних методах ведення сільського господарства в Україні в ґрунті вносяться в основному лише мінеральні добавки кислого або лужного характеру. Проте такі добрива в сучасних умовах не забезпечують повне відновлення родючості ґрунтів. Лише одночасне внесення разом з мінеральними добривами гуматів забезпечує задовільну врожайність і відновлення ґрунтів [2].

Таким чином, дія гумінових добрив на ґрунтову родючість і врожайність можна представити у вигляді комплексу взаємозв'язаних процесів:

- покращення фізико-хімічних і фізичних властивостей ґрунту;
- безпосередня дія добрив на життєдіяльність вищих рослин і мікроорганізмів;
- посилення процесів внутрішньо-ґрунтового обміну: адсорбція новими добривами елементів живлення ґрунту з поліпшенням поживного режиму розвитку рослин і посиленням біологічної активності;

Кінцевим результатом цієї дії є підвищення родючості ґрунту і збільшення врожайності.

Авторами [3] запропоновано пошарове створення комплексних органо-мінеральних добрив або виготовлення розчинів цих компонентів. Розробниками [4,5] досліджено рідкі та тверді торфо-гумінові добрива власної розробки. Водяний розчин добрив вносився двічі, при посіві та при обробці гербіцидами.

В результаті встановлено, що збільшилася кількість гумусу у ґрунті та збільшилась врожайність цукрових буряків, пшениці, сої, овесу, гречки.

Створення комплексних добрив шляхом механічного гранулювання суміші компонентів не дає рівномірної концентрації усіх компонентів в межах гранули, а тому не задовольняє вимогам пролонгованого одночасного внесення всіх компонентів. У розчинах добрив проходить відстоювання колоїдних частинок, тобто перед внесенням його необхідно проводити ретельне перемішування компонентів, та виникає необхідність забезпечення господарств спеціальною технікою для внесення рідких добрив.

Авторами [6] проаналізовано результати випробовувань добрив, створених на основі гуматів амонію та суперфосфату в Узбекистані і встановлено, що врожайність хлопку та зернових культур в 2–4 рази, що підтверджує доцільність створення різноманітних типів комплексних добрив, в залежності від конкретних агроекологічних та агро-кліматичних умов.

## **1.2 Обґрунтування створення нових мінерально-гумінових композитів**

Щорічно в Україні утворюється біля мільярда тонн відходів виробництва і споживання [7], з яких не більш 10% використовуються як вторинні матеріальні ресурси, а інші надходять на захоронення. У зв'язку з чим утилізація відходів, що утворюються в сфері виробництва і споживання, має найважливіше значення для вирішення екологічних проблем, а також раціонального ресурсоспоживання.

Застосування добрив зі змінним співвідношенням поживних, стимулюючих та розкислюючих речовин, виготовлених за індивідуальними рецептурами з урахуванням агроекологічних та кліматичних умов регіону їх застосування, сприятиме збереженню родючості ґрунтів при одночасному підвищенні кількісних та якісних характеристик врожаю, що дасть змогу

запобігти екологічній катастрофі й відновити рентабельну сільськогосподарську діяльність.

Переважно впливають на забруднення природного середовища підприємства металургійного комплексу, енергетики, паливної і хімічної промисловості [8]. Розробка та вдосконалення маловідходних і безвідходних технологій та раціональне використання вторинних ресурсів вимагає прийняття міжгалузевих рішень. Виникла не тільки гостра необхідність змінити технологічні рішення, але й надати їм природоохоронний характер.

Вторинні матеріали та ресурси [9] – відходи виробництва та споживання на даному етапі розвитку науки та техніки можуть бути використані в народному господарстві як на підприємстві, де вони були створені, так і за його межами.

Важливою проблемою в світі та, зокрема, в Україні залишається переробка відходів хімічної промисловості на корисні для народного господарства продукти.

Гострота проблеми раціонального землекористування, тісно пов'язана із забезпеченням якості життя, набуває глобального значення. Традиційні методи компенсації втрат родючості за рахунок внесення мінеральних добрив вичерпали свої можливості з точки зору екологічної безпеки.

Так, в розвинених країнах Західної Європи багато десятиліть поспіль вносили до 400 кг діючої речовини на 1 га, які містили азот, фосфор та калій, що привело до значної мінералізації ґрунтів, зокрема гумінових речовин, і, відповідно, до порушення біологічної та екологічної рівноваги у ґрунті. Тому в багатьох країнах встановили обмеження щодо застосування мінеральних речовин і, зокрема, фосфоровмісних, не більше 23% в перерахунку на  $P_2O_5$ .

Основні марки мінеральних добрив, найбільш поширені в країнах Європейської співдружності, які виробляються в Німеччині, наведені в таблиці 1.1.

Як впливає з таблиці 1.1, на ринку широко представлені прості і складні мінеральні добрива:



- азотні – N;
- азотно-фосфорні – N:P;
- азотно-калійні – N:K;
- азотно-фосфорно-калійні – N:P:K;

Зокрема в групі азотних добрив таблиця 1.1. (поз. 1–10) вміст азоту змінюється від 21% SSA (поз. 7) до Piagran (поз. 2) і Harnstoff (поз. 3) – 46%. Причому в марках добрив Urea S (поз.4), Piammon 33S (поз.5) і SSA (поз. 7) вміст сірки змінюється від 7 до 24%. Разом з тим, добриво марки Optimag, яке містить з 20% загального азоту лише 10% амонійного, хоча й містить домішки 10% MgO та 4% сірки.

Група складних добрив NPK представлена сімома марками, в яких вміст азоту змінюється від 20% (поз. 15,16) до 5% (поз. 18), вміст фосфору в перерахунку на P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> від 20% (поз. 14) до 7% (поз. 16) та калію – від 8%(поз. 15) до 24% (поз. 18).

Як впливає з таблиці 1.1, на ринку широко представлені прості і складні мінеральні добрива:

- азотні – N;
- азотно-фосфорні – N:P;
- азотно-калійні – N:K;
- азотно-фосфорно-калійні – N:P:K;

Зокрема в групі азотних добрив таблиця 1.1. (поз. 1–10) вміст азоту змінюється від 21% SSA (поз. 7) до Piagran (поз. 2) і Harnstoff (поз. 3) – 46%. Причому в марках добрив Urea S (поз.4), Piammon 33S (поз.5) і SSA (поз. 7) вміст сірки змінюється від 7 до 24%. Разом з тим, добриво марки Optimag, яке містить з 20% загального азоту лише 10% амонійного, хоча й містить домішки 10% MgO та 4% сірки.

Група складних добрив NPK представлена сімома марками, в яких вміст азоту змінюється від 20% (поз. 15,16) до 5% (поз. 18), вміст фосфору в перерахунку на P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> від 20% (поз. 14) до 7% (поз. 16) та калію – від 8%(поз. 15) до 24% (поз. 18).

Таблиця 1.1- Вміст поживних речовин в найбільш популярних мінеральних добривах на ринку країн ЄС

№	Марка добрива	Азот (N), %				P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	K <sub>2</sub> O, %	MgO, %	Сірка (S),%	Мікроелементи	Примітки
		Разом	Азот амонійний	Азот нітратний	Інші						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	<b>Азотні</b>										
1.	KAS (з Mg)	27	13,5	13,5							
2.	Piagran	46			46 Карбамід						
3.	Harnstoff	46			46 Карбамід						
4.	Urea S	38	6,6		31,4 амід – N				7		
5.	Pi ammon 33S	33	10		23 Карбамід				12		
6.	ASS	26	18,5	7,5					13	біля 50 г залізо	
7.	SSA	21	21						24		
8.	Entec 26	26	18,5	7,5					13		з уповільненням нітрифікації
9.	AHL 28	28	7	7	14 амід – N						
10.	Hydro-Sulfan	24	12	12					6		
11.	Optimag	20	10	10				10	4		
	<b>NPK</b>										
12.	16-16-16	16	9,5	6,5		16	16				
13.	13-9-16	13	8,9	4,1		9	16	7			
14.	6-20-30	6				20	30				
15.	20-8-8	20	11	9		8	3	4			
16.	20-7-10	20	12,9	7,1		7	10	4			
17.	15-15-15	15	9	6		15	15	2			
18.	5-16-24	5				16	24	4			

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	<b>PK – фосфорно-калійні</b>										
19.	12-24					12	24	6			
20.	10-21					10	21	6			
21.	10-30					10	30	4			
	азотно-фосорні										
22.	MAP	12	12				52				
23.	DAP	18	18				46				
	<b>Калійні</b>										
24.	Kail 60							60		3 натрію	Калій хлорид
25.	Kornkail o. Kamex							40	4		Калій сульфат
26.	Ratenkali							10	17		Калій сульфат
	Фосфорні										
27.	Triple-Super-phosphat										
28.	Kieserit										Мас продовговану дію і компоненти втрати Mg і K

Причому в більшій частині цих добрив присутні домішки магнію, вміст яких змінюється від 2% N:P:K = 15:15:15 (поз. 17) до 7% N:P:K = 13:19:16 (поз. 13). Для цієї групи добрив вміст MgO досягає 4-6%.

В групі азотно-фосфорних добрив MAP (поз. 22) та DAP (поз. 23) містять відповідно 12 і 18% амонійного азоту і до 52% (MAP) P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Калійні добрива (поз. 24-26) містять до 60% K<sub>2</sub>O, для чого використовують хлорид та сульфат калію.

Тобто, найбільш поширені марки мінеральних добрив в основному містять традиційні поживні речовини: азот, фосфор, калій, а, в окремих випадках, і сірку та магній. Ці марки добрив отримані за традиційною технологією та не мають органічної складової, і тому не вирішують в повній мірі проблеми, пов'язані із збільшенням антропотехнічного тиску на біоекологічну систему ґрунту, а їх дія не в змозі ефективно відтворювати процеси ґрунто- та гумусоутворення.

Відомі роботи Христової Н.А. [10] та інших авторів стосовно застосування торфогумінових добрив, одержаних шляхом обробки торфу відповідними розчинами солей або аміачної води. При цьому відбувалась часткова екстракція гумінових речовин, які входили до торфогумінових пастоподібних добрив. Їх застосування забезпечувало суттєвий приріст врожаю сільгоспкультур при одночасному покращенні продуктивної частини врожаю при кількості внесення на 1 Га, яка досягала обсягів органічних добрив до 10 т на 1 га.

При цьому було встановлено, що перевищення певної кількості гумінових речовин при внесенні призводить до пригнічення рослин.

За даними різних дослідників внесення гумінових речовин для різних ґрунтово-кліматичних зон змінюється від 0,5 до 5 кг на 1 га.

Наявність гуміново-мінеральних компонентів в ґрунті сприяє компенсації втрат родючих винесених з урожаєм, а також активізує процеси ґрунто- та гумусоутворення за рахунок активізації біохімічних процесів. Багато

дослідників [11] підтверджують важливу роль в цих процесах гумінової речовини – кальцію.

Результати досліджень багатьох авторів [10–12] вказують на те, що найбільший ефект дії гумінових речовин як стимуляторів росту рослин та покращення ґрунтогенезу відбувається при наявності сполук кальцію.

Тобто для підвищення стійкості біоекологічної системи ґрунту доцільно своєчасно вводити гуміново-мінеральний комплекс з домішками сполук кальцію. Окрім того, за рідким винятком, мінеральні добрива є фізіологічно кислими, що негативно впливає на активність гумінових речовин, а наявність кальцію суттєво зменшує кислотність ґрунту.

Звідси випливає, що гуміново-мінеральний комплекс повинен включати, окрім комплексу мінеральних поживних і гумінових речовин, сполуки кальцію, а в разі потреби інших мікроелементів, співвідношення яких визначається еколого-кліматичними умовами регіону їх застосування.

Тому необхідно обґрунтувати спосіб одержання комплексних гуміново-мінеральних добрив та провести експериментальні дослідження щодо визначення технологічних умов його здійснення.

Тобто необхідно створити і дослідити відповідний типорозмірний ряд комплексних гуміново-мінеральних добрив для різних регіонів України.

До основних вимог щодо гуміново-мінеральних добрив слід віднести:

- рівномірність розподілення мінеральних і гумінових добрив по всьому об'єму твердого композита;
- сфероподібність форми з діаметром 1,5 – 4,5 мм, і міцністю не менше 10 Н на гранулу;
- пролонгованість дії добрив;
- не злежуваність при зберіганні;
- легке дозування та відсутність пилоутворення при транспортуванні.

Відповідність наведеним вимогам дозволить вносити ці добрива одночасно при сівбі носіння і забезпечити живлення рослин протягом всього періоду вегетації та стійкість екобіологічної системи ґрунтогенезу. При цьому

суттєво зменшуються енергозатрати на внесення добрив до ґрунту та ризик негативної дії потужних сільськогосподарських машин на ґрунт.

Доцільно застосувати методи, які б дозволили досягти рівномірність розподілення на  $5-10 \cdot 10^{-6}$  м. Враховуючи те, що базовою сировиною для створення нового покоління гуміново-мінеральних добрив є великі обсяги водяних розчинів сульфату амонію, які утворюються на виробництві капролактаму, доцільно проводити синтез гуміново-мінеральних комплексів шляхом зневоднення та грануляції комплексних рідких систем.

Традиційна технологічна схема передбачає проведення процесів: випарки, кристалізації, центрифугування, гранулоутворення та сушки в барабанних грануляторах. Така кількість технологічних стадій разом з низьким термічним ККД в барабанних сушарках має великі енерговитрати і не забезпечує відповідної якості гранульованих добрив.

Для створення комплексних гуміново-мінеральних добрив пропонується застосувати техніку псевдозрідження. Це дозволить сумістити всі технологічні стадії в одному апараті при термічному ККД вище 50% і забезпечити одержання твердих багатошарових композитів із заданими властивостями.

### **1.3 Світова практика виробництва гранульованих добрив при зневодненні рідких систем**

#### **1.3.1 Обладнання для отримання гранульованих органо-мінеральних добрив**

Основні способи гранулювання які використовуються для одержання гранульованих органо-мінеральних добрив [13]:

1. Обкатування – процес здійснюють у барабанних, тарілчастих, швидкісних і вібраційних грануляторах, рисунок 1.1.

2. Пресування – одержання гранул у формі брикетів, плиток, таблеток шляхом ущільнення сухих порошків, іноді з наступним дробленням спресованого матеріалу, рисунок 1.2.

3. Грануляція кристалізацією частинок на поверхні частинок. Метод застосовують для гранулювання розплавів добрив у порожніх вежах, а також для гранулювання з використанням розчинів, суспензій і пульпи у барабанних грануляторах-сушарках і апаратах з псевдозрідженим шаром, рисунок 1.3.



Рисунок 1.1– Гранулятор обкатування



Рисунок 1.2– Роторна таблеточна машина



Рисунок 1.3 – Гранулятор із псевдозріженим шаром

### 1.3.2 Гранулятори псевдозріженого шару

Переваги техніки псевдозрідження – суміщення низки технологічних стадій для одержання гранульованого продукту в одному апараті, при цьому коефіцієнт використання теплоти складає  $>60\%$  з можливістю отримання гранульованого продукту у вигляді сферичних гранул обумовили широке використання апаратів псевдозріженого шару в процесах грануляції органо-мінеральних добрив.

Особливості процесу грануляції в псевдозріженому шарі визначають конструкції апаратів.

Харківська компанія «NRG» пропонує гранулятор з псевдозріженим шаром (рисунок 1.4) [29], що може використовуватись в фармацевтичній, харчовій промисловості, для виготовлення пестицидів, фарбників, добрив, а також для покриття готових гранул плівкою.

Основним недоліком апаратів даного типу є низька міцність гранул оскільки відбувається утворення мікрокристалів на поверхні частинок з низькою утримуючою здатністю. До недоліків також слід віднести неможливість рівномірного розподілу компонентів по всьому об'єму гранули.

Апарат WSG [30] гранулятор з псевдозріженим шаром від компанії Glatt



(рисунок 1.5) призначений для агломерації-гранулювання з високими рівномірністю та відтворюваністю процесу. Характеризується високою швидкістю сушіння.

Недоліком цих установок є локальне підведення рідкої фази через форсунки, які не придатні для зневоднення грубих суспензій робочого розчину і мають обмеження по навантаженню за вологою, що приводить до збільшення кількості форсунок на одному розпилювачі.

Обсяг порції, що завантажується в апарат, складає від 5 кг до 1500 кг. Обробка продукту відбувається в щадному режимі [14].



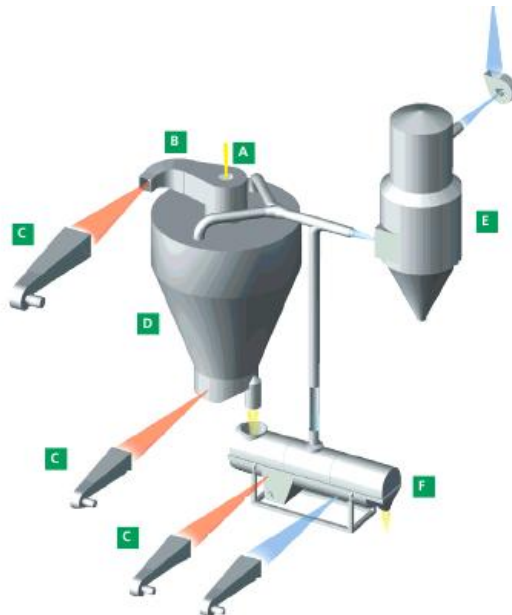
Рисунок 1.4 – Гранулятор GMP стандарту



Рисунок 1.5 – Гранулятор серії WSG

Німецька компанія «Powder Technology Division of GEA» [14] пропонує гранулятори торгової марки FSD (рисунок 1.6), в яких відбувається сушіння-грануляція порошків будь-якої природи у псевдозрідженому шарі.

В більшості перерахованих апараті для отримання гранул використовуються методом агломерації, що не дозволяє гранульованому продукту досягти необхідної міцності, та не забезпечує рівномірне розподілення органічних компонентів по об'єму вміст яких складає 2% від маси гранул, а оскільки процес агломерації відбувається хаотично, то це негативно впливає на стійкість кінетики гранулоутворення. Також в переважній більшості випадків для подачі розчину в середину шару використовують форсунки, використання яких неможливе при роботі з гетерогенними розчинами.



А – вхідний отвір, В – диспергатор, С – подача гарячого повітря, D - сушильна камера, Е - газоочистка, F - збірник готового продукту.

Рисунок 1.6 – Схема гранулятора ТМ «FSD»

Отже для проведення сталого контрольованого процесу утворення органо-мінеральних композитів з пошаровою структурою необхідно використовувати апарат, що буде відповідати наступним вимогам:

- подача рідини безпосередньо в шар;
- робота з гетерогенними розчинами при великих концентраціях

твердих частинок;

- керування гідродинамічною ситуацією в апараті для запобігання агломерації;
- наявність обладнання для сепарації, для забезпечення безперервності процесу, або організація рециклу;

#### **1.4 Моделювання процесу утворення гуміново-мінеральних композитів у псевдозрідженому шарі**

Процес обезводнювання крапель розчинів в потоці газоподібного теплоносія складається з 5 періодів сушки: 1 – прогрів краплі, 2 – сушка при постійній швидкості, 3 – утворення твердої поверхні та нагрів до температури кипіння, 4 – сушка при постійній швидкості і температурі краплі, 5 – сушка з падаючою швидкістю. Автори [15] розглядають процес сушки, базуючись на балансових рівняннях, і вважають, що утворення твердої оболонки відбувається на початку сушки, а, отже, з'являються центри гранулоутворення.

В 4 періоді можливе руйнування краплі [16] внаслідок паровибухового ефекту, а також теплових напруг, які виникають при періодичному нагріванні та охолодженні часточок у псевдозрідженому шарі [17–19].

При зневодненні розчинів або охолодженні розплавів у псевдозрідженому шарі частина вихідної речовини не закріплюється на поверхні гранул у шарі, а утворює нові центри грануляції [15–19]. Процес імпульсивного нанесення тонких плівок на поверхню супроводжується кристалізацією на частинках у вигляді тонких шарів кристалів. Ріст гранул тим імовірніший, чим більші сили адгезії краплі рідини з твердими частинками [20].

В свою чергу, адгезійні властивості краплі залежать від жорсткості поверхні гранул і властивостей розпилюваної речовини. Найбільш важливим в цьому випадку є співвідношення в краплі рідини рідкої та твердої фаз.

Існують й інші механізми утворення нових центрів грануляції, наприклад, в результаті механічного або теплового подрібнення гранул. В останньому

випадку механізм процесу подрібнення зводиться до такого. Гранули більші за середній розмір частинок, циркулюють між зонами активного теплообміну (зоною біля газорозподільної решітки 20-30 мм та зоною зрошення). Зона зрошення має найнижчу температуру. В результаті, у гранулі виникають термічні напруження, які і призводять до подрібнення гранул.

Механізм подрібнення гранул в апараті є дуже суттєвим для кінетики безрециклового процесу гранулоутворення при зневодненні розчинів з отриманням готового продукту заданого дисперсного складу.

Поряд з утворенням нових центрів грануляції і ростом їх розмірів за рахунок нашарування на поверхні твердих частинок мікрочастинок у псевдозрідженому шарі можливий ріст гранул за рахунок агломерації окремих частинок. Це відбувається внаслідок дії сил зчеплення між частинами в момент їх зіткнення при наявності плівки рідини або її залишків на одній з них. При надлишку рідини на поверхні частинки, адгезійні сили та сили інерції руху спричиняють утворення агломератів. В подальшому при кристалізації речовини з рідкої фази утворюються кристалічні містки, які міцно з'єднують частинки в агломерати. Якщо утворені містки мають недостатню міцність, тоді агломерати розвалюються під час інтенсивного руху агломерату у псевдозрідженому шарі.

Як видно, грануляція у псевдозрідженому шарі супроводжується складними тепломасообмінними і гідродинамічними процесами росту гранул, які додатково підсилюють утворення нових центрів грануляції, при одержанні готового продукту заданого дисперсного складу.

В роботі [21] запропоновано визначити гранулометричний склад продукту шляхом сумісного рішення рівнянь швидкості росту окремих частинок і розподілення гранул за часом перебування їх в апараті. Так, для полідисперсного ретурну при експоненційному законі росту розмірів частинок та ідеальному перемішуванню в шарі, гранулометричний склад розраховується за виразом [21]:

$$F(d_i) = \sum_{k=1}^{k=n} F(d_i, d_p) \cdot P_k, \quad (1.1)$$

$$F(d_i, d_0) = 1 - \exp\left[\frac{-3 \cdot (Q_M + Q_P)}{K \cdot Q_P (\ln d_i / d_0)}\right], \quad (1.2)$$

де  $d_0, d_i, d_p$  – початковий і поточний діаметри частинок шару, діаметр частинок ретуру;  $Q_M, Q_P$  – витрати сухого матеріалу, що вводиться в шар з рідиною і ретуром;  $K$  – коефіцієнт гранулоутворення;  $P_K$  – вміст “К-ої” фракції в ретурі.

Коефіцієнт  $K$  показує, яка доля від введеної з рідкою фазою речовини розподіляється на поверхні частинок. Якщо  $K < 1$ , утворюються нові частинки – центри грануляції. Для випадку, коли  $K > 1$ , проходить агломерація частинок. Якщо  $K = 1$ , то проходить процес грануляції, який характеризується нормальним ростом, це означає, що розпилювання рідини повністю розподіляється на поверхні частинок.

Враховуючи те, що псевдозріджений шар не є однорідним, а містить певну кількість частинок різних розмірів і загальна поверхня частинок є змінною, авторами [19] запропоновано описувати таку систему статистичними методами.

Так, О. М. Годесом запропоновано описувати дисперсний склад частинок у псевдозрідженому шарі таким рівнянням [19]:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{\partial(\lambda p)}{\partial x} = \varphi(x) + \psi(\rho) - G(x), \quad (1.3)$$

де  $\varphi(x), \psi(\rho), G(x)$  – функції розподілення за розмірами частинок, введених в киплячий шар, утворених в шарі і вивантажених частинок;  $\lambda = \frac{\partial x}{\partial \tau}$  – лінійна швидкість росту частинок;  $\rho(x, \tau)$  – функція розподілення частинок за розмірами.

Недоліком моделі є те, що не враховується те, що не всі сухі речовини, які кристалізуються на поверхні центрів грануляції закріплюються на ній, що суттєво впливає на величину лінійної швидкості росту гранул, а також інерційний винос частинок дрібних фракцій. Окрім того, дослідним шляхом

необхідно визначити закон росту та потужність функції розподілення внутрішнього джерела центрів грануляції.

Автори [20,21] вважають, що двохфазна модель містить в собі відомі модифікації моделей. Хаотичний рух зерен шару, які безперервно міняють положення і швидкість, до деякої міри нагадує рух молекул в газі і рідині. З урахуванням цього для опису структури псевдозрідженого шару можливо застосовувати підходи і методи молекулярної статистичної фізики. Так, якщо для частинок твердої фази ввести функцію розподілення за координатами і швидкостями  $f(r, v, t)$  і скласти для них рівняння, виходячи з уявлень кінетичної теорії газів, то отримаємо закономірність:

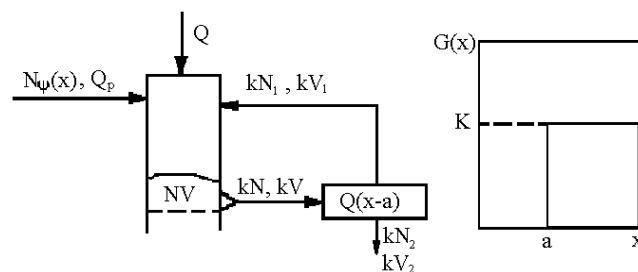


Рис.1.15. Схема матеріальних потоків процесу грануляції в псевдозрідженому шарі з селективним вивантаженням.

$$\frac{\partial f}{\partial t} \left[ \nabla_t \bar{f} + \text{div} \left[ \frac{\bar{F}}{m} \right] f \right] = I[f, f_1], \quad (1.4)$$

де  $I[f, f_1]$  – зміна числа частинок з даною швидкістю  $v$  внаслідок зіткнення з частинками інших швидкостей  $v_1$ ;

$\bar{F}$  - сила, що діє на частинку.

Розв'язок даного рівняння дозволяє описати ряд процесів в псевдозрідженому шарі, однак дана статистична модель не дає пояснення природі циркуляційних потоків в псевдозрідженому шарі при проведенні тепло-масообмінних процесів.

Автором [22] запропонована модель взаємопроникаючих середовищ. Сутність цього підходу полягає в тому, що локальний нескінченно малий об'єм вважається досить представницьким і містить одночасно суцільну та дискретну

фазу в відношеннях  $\varepsilon/(1-\varepsilon)$ . Суцільна фаза (газ) в усіх точках цього об'єму вважається такою, що рухається з однаковою швидкістю  $v(r, t)$ . Сила міжфазової взаємодії обох континуумів  $\vec{F}$ , відносно одиниці об'єму, вважається залежною від цих миттєвих середніх значень величин  $u$ ,  $v$  та  $\varepsilon$  в представленому об'ємі, але, взагалі,  $\vec{F}(u, r, \varepsilon) \neq \vec{F}(\bar{u}, \bar{r}, \bar{\varepsilon})$ . Тому, що у виразах для цієї враховується ще й ефект приєднання маси рідини, яка захоплюється твердою частинкою. З урахуванням цього для обох фаз записується рівняння:

- нерозривності:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon \cdot \bar{u}) = 0 \quad \text{та} \quad \frac{\partial}{\partial t}(1-\varepsilon) + \text{div}((1-\varepsilon)\bar{v}) = 0 \quad (1.5)$$

- руху:

$$\begin{aligned} \rho(1-\varepsilon) \left[ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v}\nabla)\bar{v} \right] &= (1-\varepsilon)\text{div}(E) + \vec{F} + (1-\varepsilon) - \text{div}(E_t); \\ \varepsilon \left[ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u}\nabla)\bar{u} \right] &= \varepsilon \cdot \text{div}(E) - \vec{F} + \varepsilon \rho \vec{g}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

де  $E$ ,  $E_t$  – середні тензори напруги в потоці твердих частинок та зріджуючого агента, що знаходяться під тиском  $P$  та  $P_t$  та мають в'язкості  $\mu$  та  $\mu_t$  обох континуумів;

$\rho$ ,  $\rho_t$  – густина середовища та твердих частинок;

$g$  – прискорення сили тяжіння.

Таким чином, одержимо 8 диференціальних рівнянь для знаходження трьох компонент  $v$ , трьох компонент  $u$ , порозності  $\varepsilon$ , тиску  $P$ , які потрібно розв'язати з урахуванням усіх граничних і початкових умов.

В цілому не зважаючи на значну кількість виконаних пошуків і варіантів, дана модель поки мало дала як для розуміння псевдозрідженого шару, так і для конкретних макроскопічних залежностей. Загальна складність – неможливість отримання достовірних експериментальних даних, які підтверджують той чи інший вид посередніх тензорів напруги  $E$ , та  $E_t$ .

Один із варіантів двофазної моделі передбачає, що при  $U > U_{кр}$  весь надлишок газу проходить крізь шар у вигляді бульбашок, а крізь розсунуту

цими бульбашками “щільну фазу” проходить з тією ж швидкістю  $U_{кр}$ , як на початку псевдозрідження.

Таким чином, всередині псевдозрідженого шару переміщуються області лише з двома визначеними граничними значеннями порозностей  $\varepsilon=\varepsilon_0$  і  $\varepsilon=1$ . Легкі бульбашки підіймаються і, доходючи до його верхнього рівня, “вибухають”, викидаючи фонтани частинок в надшаровому просторі. Підйом цих бульбашок обумовлює рух потоків твердої фази. Виникає також безперервний теплообмін між бульбашками і щільною фазою.

Деякі основні співвідношення, отримані з допомогою цієї моделі:

- швидкість підйому бульбашки в суцільній фазі з порозністю  $\varepsilon_{кр}$  та діаметр бульбашки  $d_б$  [22]:

$$V = 0,71 \sqrt{gd_б \frac{(\rho_m - \rho)(1 - \varepsilon_{кр})}{\rho_m(1 - \varepsilon_{кр}) + \rho\varepsilon_{кр}}} \quad (1.7)$$

Витратна швидкість псевдозрідженого середовища складається з двох потоків:

$$U = U_{кр}(1 - \varepsilon_{кр}) + V_б\varepsilon_б, \quad (1.8)$$

де  $\varepsilon_б$  - частина об'єму, що зайнята бульбашками.

При псевдозрідженні газами  $\rho \ll \rho_m$  і тоді  $V_б \approx 0,71\sqrt{gd_б}$

Враховуючи те, що основним завданням при виробленні гранульованих органомінеральних добрив є запобігання деструкції гумінових речовин, розрахунок поля температури в зоні інтенсивного теплообміну, що прилягає до газорозподільного пристрою є основною задачею математичного опису. При створенні способу зневоднення і грануляції композитних рідких систем, що містять мікроелементи та органічні речовини.

В процесі гранулоутворення гуміново-мінеральних добрив з застосуванням техніки псевдозрідження необхідно врахувати полідисперсну природу вихідного розчину, баланс між внутрішнім та зовнішнім рециклом та взаємовплив технологічних факторів безперервного процесу, що дозволить отримати гранули з рівномірним розподіленням гумінових, мінеральних, розкислюючих й поживних компонентів по всьому об'єму гранули.



Наведені математичні моделі не враховують стохастичну природу процесу гранулоутворення і взаємовплив факторів, які визначають динаміку процесу та якість кінцевого продукту. Використання статистичних методів з урахуванням взаємовпливу параметрів процесу дозволить визначити умови проведення стійкого процесу, а також, при необхідності, адекватної їх зміни.

## **2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ МІНЕРАЛЬНО-ГУМІНОВИХ ТВЕРДИХ КОМПОЗИТІВ**

### **2.1 Фізичне моделювання процесу утворення твердих композитів з рідких систем**

Складні багатофакторні процеси утворення твердих композитів з пошаровою структурою з рідких систем умовно можна розділити на дві стадії: перша – процеси переносу при міжфазному контакті та здійснення масової кристалізації з одночасним формуванням твердого композиту у вигляді сфероподібної гранули, та друга – організація процесу гранулоутворення в дисперсних системах із застосуванням техніки псевдозрідження.

#### **2.1.1 Обґрунтування фізичної моделі утворення мінерально-гумінових твердих композитів**

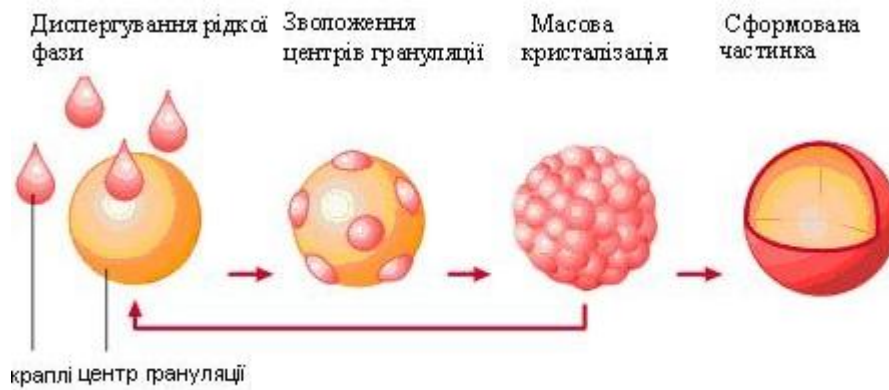
Основною вимогою при створенні композитних добрив, що містять мінеральні та органічні речовини, ціллю застосування яких є збереження екологічної рівноваги ґрунтів, є рівномірність розподілення компонентів по всьому об'єму гранули. У випадку використання в якості сировини водних розчинів сульфату амонію виробництва капролактаму з метою створення гранульованих мінерально-гумінових добрив нового покоління найбільш доцільною є масова кристалізація з рідких систем, які одночасно містять і гумінові речовини. Інтенсивність підведення теплоти до рідкої фази та колоїдні частинки органічних речовин визначають розмір мікрочастин на рівні  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  м.

Сульфат амонію є фізіологічно кислим добривом, тому для зниження його кислотності доцільно вводити до складу композиту і кальцієво-місні речовини, наприклад,  $\text{CaCO}_3$ , в дрібнодисперсному стані.

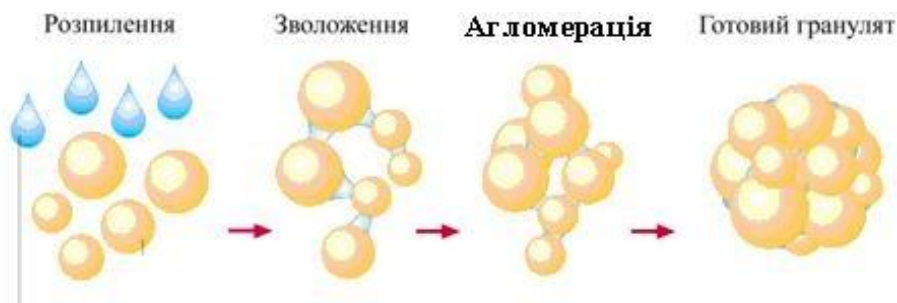
Для одержання твердих композитів у вигляді сфероподібних частинок з розміром 1,5-4,5 мм необхідно здійснити після масової кристалізації ще й

релаксацію утвореного мікрошару на поверхні частинки. При цьому міцність утворених гранул повинна бути не менше 10 Н на гранулу.

Для реалізації цього способу найбільш доцільно застосувати масову кристалізацію із грануляцією в дисперсних динамічних системах. При цьому можливі такі механізми утворення твердих композитів, рис. 2.1.



а)



б)

Рисунок 2.1 – Можливі механізми утворення твердих гуміново-мінеральних композитів а) кристалізація, б) агломерація

Механізм, рис. 2.1а) утворення композитів з пошаровою структурою здійснюється за такою послідовністю: рідка фаза диспергується в двофазну систему зернистий матеріал – газовий теплоносіє, і за рахунок дії адгезійно-сорбційних сил утримується на поверхні твердих частинок у вигляді надтонкої плівки, до якої від нагрітих твердих частинок і газового теплоносія підводиться теплота.

Це призводить до інтенсивного випаровування розчинника, в результаті чого на поверхні твердих частинок утворюється тонкий шар з мікрокристалів

мінеральних речовин та осаджених між ними колоїдних часток гумінових сполук з розмірами  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  м.

Одержаний готовий продукт – 90% за масою сфероподібних частинок з розмірами 1,5 – 4,5 мм.

Розрахункова кількість шарів для гранули діаметром 2,5 мм дорівнює 500. Завдяки цьому буде досягатись рівномірність розподілення мікро- та макродомішок в усьому об'ємі гранули.

Для здійснення описаного механізму утворення композитів необхідно забезпечити регулярне послідовне проходження кожною частинкою описаних стадій процесу, рис. 2.2.

### **2.1.2 Фізична модель утворення органо-мінеральних твердих композитів в дисперсних системах**

Механізм утворення мінерально-гумінових твердих композитів в апараті з псевдозрідженим шаром наведено на рис. 2.2.

Фізичну модель процесу зневоднення та грануляції розчинів у псевдозрідженому шарі можна умовно представити у вигляді ряду елементарних процесів:

- псевдозрідження твердих частинок нагрітим теплоносієм (зона I);
- розподілення рідкої фази по поверхні частинок (зона II);
- випаровування вологи з поверхні частинок (зона III);
- кристалізація розчинів на поверхні частинок і збільшення за рахунок цього їх розміру (зона IV);
- вивантаження гранульованого продукту (зона V);
- зміна (стабілізація) дисперсного складу частинок за рахунок подрібнення великих гранул в шарі – внутрішній рецикл, або шляхом введення нових центрів грануляції із зовні – зовнішній рецикл. (зона VI)

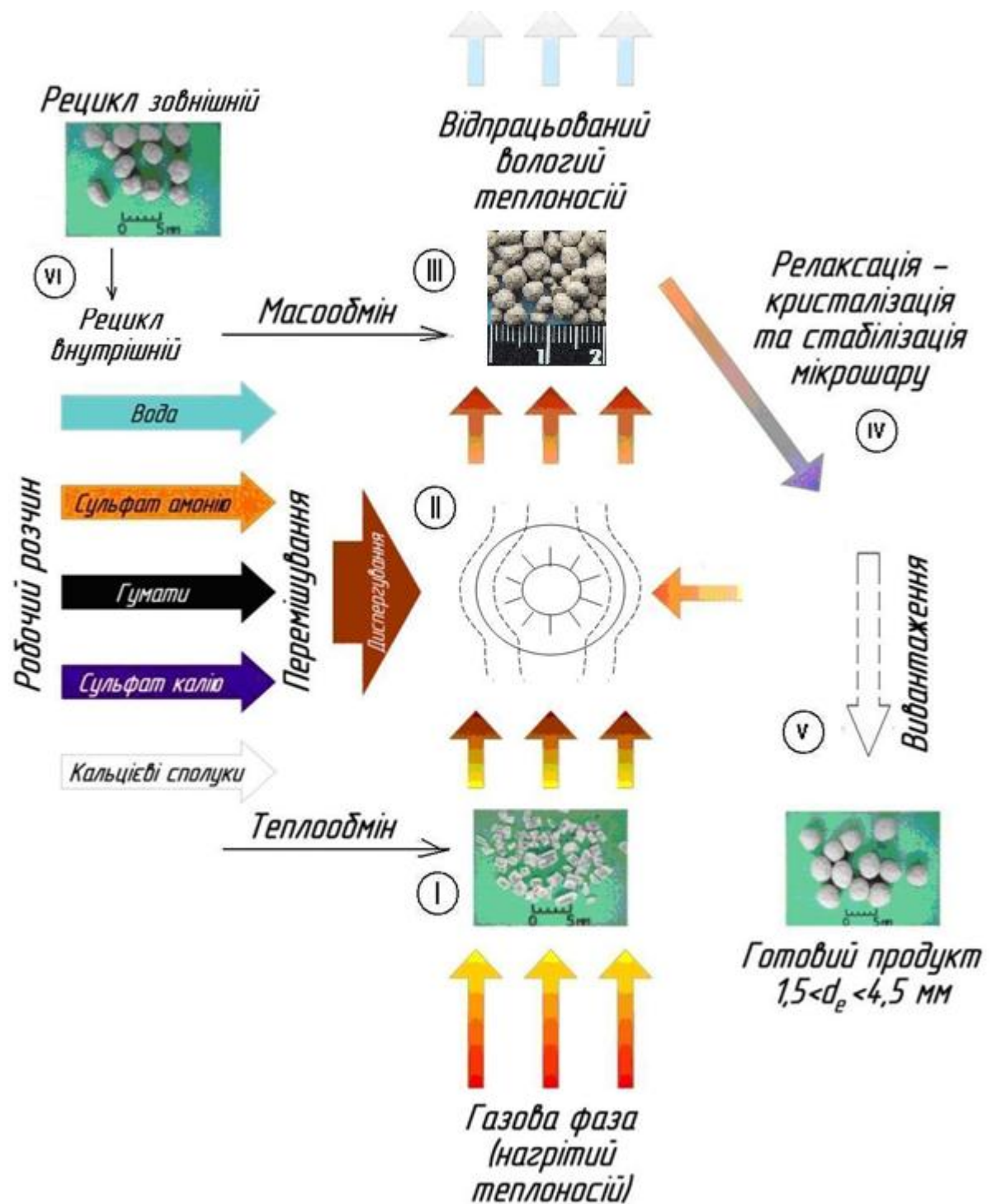


Рисунок 2.2 – Схема утворення багатошарових мінерально-гумінових твердих композитів в апараті з псевдозрідженим шаром

I – зона інтенсивного теплообміну; II – зона введення рідкої фази; III – зона масообміну та перерозподілу вологи між твердими частинками; IV – зона релаксації та масової кристалізації; V – зона вивантаження гранульованого продукту; VI – зона рециклу (зовнішнього та внутрішнього).

Така схема організації дозволяє застосування теплового носія, температура якого в декілька разів перевищує температуру плавлення матеріалу, що суттєво підвищує ефективність процесу.

Процес зневоднення рідини на окремій гранулі можна представити, як: в зоні зрошування рідка фаза наноситься на поверхню гранул й частково поглинається за рахунок сорбції. Глибина проникнення сорбційного фронту всередину гранули визначається тепловим балансом окремої гранули. При цьому до плівки рідини підводиться теплота з двох сторін: конвективно від зріджувального агента і кондуктивно від гранули. Якщо сумарна кількість теплоти, підведеної до гранули, буде достатньою для випаровування вологи, то кристалізація розчину починається на поверхні гранули, що і зумовлює збільшення її розміру.

У випадку, коли кількість теплоти є недостатньою для видалення вологи, що потрапила на гранулу з розчином, відбувається повне вбирання розчину всіма порами гранули, внаслідок чого вона зволожується і її температура зменшується конвективно від нагрітого теплоносія. При досягненні на поверхні рівноважної вологості, температура гранули підвищується до температури теплоносія в псевдозрідженому шарі, тобто до 100-110°C. Таким чином, градієнти вологовмісту і температури в гранулі спрямовані назустріч один одному. Внаслідок цього кристалізація розчину починається з поверхні гранули, що призводить до закупорки пор гранули. При багаторазовому повторенні таких циклів проходить сильна закупорка каналів пор гранул, особливо в великих гранулах, і при досягненні температури 100-110°C, зростає тиск пари всередині гранули, що спричинює її подрібнення. Утворені осколки великої гранули, розміри яких не менше третини максимального діаметру, стають новими центрами грануляції. Тобто реалізується внутрішній рецикл.

Крім того, поряд з процесом кристалізації розчинів на поверхні частинок і утворення шару твердої речовини, проходить стирання гранул при їх русі у псевдозрідженому шарі. Тому лінійною швидкістю зросту гранули є результат взаємодії двох цих процесів.

Важливою умовою стійкого процесу є забезпечення балансу кількості частинок в системі. Приріст маси частинок в псевдозрідженому шарі здійснюється за рахунок кристалізації розчину на їх поверхні. Дотримання умови постійного гідравлічного опору псевдозрідженого шару (маси шару), призведе до зменшення числа частинок, і отже, до зменшення їх сумарної поверхні. Виконання цієї умови відбувається за рахунок вивантаження окремих частинок, що є основною причиною зменшення кількості частинок в апараті. Тому зменшення кількості частинок компенсується за рахунок подрібнення великих гранул, тобто за рахунок безрециклового процесу. У випадку, якщо потужність утворення нових центрів грануляції буде недостатньою, необхідно вводити нові центри грануляції із зовні – зовнішній рецикл.

Метою проведення процесу є утворення твердих композитів з пошаровою структурою сфероподібної форми, що містять: 90% за масою частинок діаметром 1,5 – 4,5 мм.

## **2.2 Математична модель утворення багат шарових гуміново-мінеральних добрив**

На підставі фізичної моделі утворення твердих композитів в псевдозрідженому шарі для математичної моделі приймалися такі припущення:

Найбільш доцільно для математичного опису процесу грануляції прийняти такі припущення:

- рідка фаза формується на розвиненій поверхні твердих частинок у вигляді надтонкої плівки за рахунок дії адгезійно-сорбційних сил;
- теплота, яка підводиться до плівки рідини від нагрітої гранули і зріджуючого агента – теплоносія, є достатньою для інтенсивного випаровування розчинника та утворення на її поверхні композитного мікроснару, який зумовлює збільшення розмірів твердих частинок;
- новоутворений на поверхні шар, що містить мікрокристали і мікрочастинки, частково стирається при хаотичному русі гранул у псевдозрідженому шарі;

- у псевдозрідженому шарі після зони зрошення існують вологі гранули, які поглинають теплоту за рахунок випаровування розчинника та сухі, більш нагріті, які віддають теплоту;
- розташування вологих гранул між сухими підпорядковуються нормальному закону розподілення;
- гранули сферичної форми відносно нерухомі і розподілення їх у псевдозрідженому шарі підпорядковується середньостатистичному розподілу;
- зіткнення гранул між собою носить короточасний характер, тому кондуктивним теплообміном між ними можна зневажити;
- механізм теплообміну в теплоносії ґрунтується на вимушеній конвекції, а в гранулах на теплопровідності;
- маса рідини, що утримується гранулою, пропорційна її поверхні;
- на відстані  $10 \div 15D_e = 25-37$  мм від газорозподільчого пристрою відбувається практично повна реалізація корисної різниці температур  $T_{вх} - T_{ш}$ ;
- теплоносій є нестисливою рідиною [36];
- апарат має циліндричну форму.
- збільшуються за розмірами тільки вологі гранули;
- випаровування вологи з робочого розчину і кристалізація речовин відбувається на поверхні гранул;
- гранули мають сферичну форму.

В основу математичної моделі опису процесу гранулоутворення покладена статистична модель рівняння суцільності розмірів у просторі [37]. У відповідності з цим рівнянням баланс кількості частинок у заданому об'ємі має вигляд:

$$\frac{\partial f(v)}{\partial \delta} + \frac{\partial f(\lambda_v)}{\partial v} = 2 \cdot \int_{u=0}^{u=\infty} P(u, v) f(u) du - \int_{\omega=0}^{\omega=v} P(v, \omega) f(\omega) d\omega - K \cdot f(v),$$

де  $f(v)$  - функція розподілення числа частинок по об'єму  $1/m^3$ ;  $\lambda_v$  - об'ємна швидкість гранул,  $m^3/год$ ;  $K$  - константа вивантаження,  $1/год$ ;



$\int_{u=0}^{u=\infty} P(u,v)f(u)du$  - функція джерела частинок, які утворюються за рахунок

подрібнення гранул;  $\int_{u=0}^{u=\infty} (v,\omega)f(\omega)d\omega$  - функція витoku частинок.

При цьому вважаємо, що весь матеріал з рідкої фази осідає на поверхні гранул.

В реальних умовах на поверхні гранул осаджується не весь матеріал, після заміни розподілення числа частинок в об'ємі на розподілення маси частинок за діаметром отримаємо рівняння:

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} + 2 \left[ \Lambda \frac{\partial g}{\partial D} + g \frac{\partial \Lambda}{\partial D} - \frac{3\Lambda g}{D} \right] = -S\psi Kg + \varphi(D), \tau > 0, 0 < D < \infty, \quad (2.1)$$

де  $g$  - функція масового розподілення гранул за діаметром,  $\text{мм}^{-1}$ ;  $\tau$  - час, год.;  $D$  - поточний діаметр гранул,  $\text{мм}$ ;  $\Lambda$  - лінійна швидкість росту гранул,  $\text{мм/год.}$ ;  $S$  - функція сепарації;  $\psi$  - коефіцієнт гранулоутворення;  $K$  - константа вивантаження,  $\text{год}^{-1}$ ;  $\varphi$  - функція потужності джерела та стоку гранул,  $(\text{мм}\cdot\text{год.})^{-1}$

Константа вивантаження реального продукту  $K^*$  розраховується, як:

$$K^* = K\psi = \frac{V_m^*}{V_{\text{шару}}} = \frac{G_m\psi}{G_{\text{шару}}} = \frac{G_{2p}}{G_{\text{шару}}} = \text{const},$$

тоді можна записати, що

$$V_{\text{шару}} = \frac{V_m^*}{K\psi}, \quad (2.2)$$

де  $K^*$  - фактична константа вивантаження готового продукту,  $\text{год}^{-1}$ ;  $V_m^*$  - об'єм матеріалу, що осаджується на гранулах за одиницю часу,  $\text{м}^3/\text{год.}$ ;  $V_{\text{шару}}$  - об'єм псевдозрідженого шару,  $\text{м}^3$ ;  $G_{\text{шару}}$  - маса гранульованого продукту в псевдозрідженму шарі,  $\text{кг}$ ;  $G_m$  - маса матеріалу, що надходить в апарат за одиницю часу (витрати),  $\text{кг/год.}$ ;  $G_{2p}$  - маса матеріалу, що осаджується на гранулах за одиницю часу,  $\text{кг/год.}$

Зв'язок між лінійною швидкістю росту гранул і функцією масового розподілення описується рівнянням

$$\int_0^{\infty} \pi D^2 \Lambda_{\tau, D} \frac{\hat{D}^3}{\pi D^5} g(D) \frac{\pi D^2}{2} dD = V_m^*,$$

або

$$\frac{\pi \hat{D}^3}{2} \int_0^{\infty} \Lambda_{\tau, D} \frac{g(D)}{D} dD = V_m^*, \quad (2.3)$$

$$\int_0^{\infty} \frac{\pi D^3}{6} \frac{\hat{D}^3}{\pi D^5} g(D) \frac{\pi D^2}{2} dD = V_{\text{шару}},$$

з урахуванням (2.2) можна записати

$$K\psi \frac{\pi D^3}{12} \int_0^{\infty} g(D) dD = V_m^*, \quad (2.4)$$

прирівнюючи праві частини (2.3) і (2.4), отримаємо

$$\frac{\pi \hat{D}^3}{2} \int_0^{\infty} \Lambda_{\tau, D} \frac{g(D)}{D} dD = K\psi \frac{\pi \hat{D}^3}{12} \int_0^{\infty} g(D) dD,$$

або

$$\int_0^{\infty} \Lambda_{\tau, D} \frac{g(D)}{D} dD = \frac{K\psi}{6} \int_0^{\infty} g(D) dD. \quad (2.5)$$

$$\hat{D} = \int_0^{\infty} D g(D) dD \quad (2.6)$$

Формула (2.6) – еквівалентний діаметр гранул в апараті з псевдозрідженим шаром, мм.

Початкові умови

$$g_0(D, \tau=0) = f(D). \quad (2.7)$$

Граничні умови

$$g(D=0, \tau>0) = 0; \quad g(D=\infty, \tau>0) = 0. \quad (2.8)$$

$$\int_0^{\infty} g(D) dD = 1 \quad (2.9)$$

де  $g(D)$  – нормована функція розподілу гранул за діаметром.

За результатами попередніх експериментів було визначено, що гранули мають нульовий порядок росту, тобто  $\frac{\partial \Lambda}{\partial D} = 0$ . Тоді (2.1) набуває вигляду:

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} + 2 \left[ \Lambda \frac{\partial g}{\partial D} - \frac{3\Lambda g}{D} \right] = -S\psi Kg + \varphi(D), \quad \tau > 0, 0 < D < \infty. \quad (2.10)$$

Звідки лінійна швидкість росту гранул визначиться як:

$$\Lambda \tau = \frac{K\psi}{6 \int_0^{\infty} \frac{g(D)}{D} dD} \quad (2.11)$$

З урахуванням нульового порядку росту гранул,  $\partial \Lambda / \partial D = 0$  рівняння (2.1) набуває вигляду:

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} + 2 \left[ \Lambda \frac{\partial g}{\partial D} - \frac{3\Lambda g}{D} \right] = -S\psi Kg + \varphi(D), \quad \tau > 0, 0 < D < \infty \quad (2.12)$$

Звідки функція потужності джерела центрів грануляції визначиться, як:

$$\varphi(D) = \frac{\partial g}{\partial \tau} + 2 \left[ \Lambda \frac{\partial g}{\partial D} - \frac{3\Lambda g}{D} \right] + S\psi Kg, \quad (2.13)$$

Для стаціонарного процесу, коли  $\partial g / \partial \tau = 0$  рівняння (2.13) набуває вигляду:

$$\varphi(D) = 2 \left[ \Lambda \frac{\partial g}{\partial D} - \frac{3\Lambda g}{D} \right] + S\psi Kg \quad (2.14)$$

Для забезпечення стабілізації дисперсного складу в апараті при загальному вивантаженні розраховуємо потужність узагальненої функції джерела нових центрів грануляції, яка реалізується у вигляді зовнішнього рециркулу.

$$\varphi(D) = \varphi_{\text{зов}} + \varphi_{\text{вн}},$$

де  $\varphi_{\text{зов}}$  – потужність зовнішнього джерела, 1/(мм·год.),  $\varphi_{\text{вн}}$  – потужність внутрішнього джерела, 1/(мм·год.).

З рівняння (2.14) розраховуємо потужність розрахункової функції  $\varphi(D)$ , яка забезпечує стабілізацію дисперсного складу і порівнюємо з потужністю, визначеною з експерименту  $\varphi_{\text{вн}}(D)$ . Потужність компенсаційної функції визначиться за виразом:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{зов}} = \varphi(D) - \varphi_{\text{вн}}(D). \quad (2.15)$$

Якщо в даному інтервалі діаметрів функція  $\Delta\varphi$  набуває від'ємних значень, це характеризує недостатню потужність внутрішнього джерела. В разі набуття

позитивних значень  $\Delta\phi$  в певному інтервалі процес супроводжується надмірною інтенсивністю утворення гранул з такими розмірами.

Для визначення потужності джерела нових центрів грануляції необхідно з ціллю стабілізації дисперсного складу частинок в межах 1,5÷4,5 мм проводити розрахунок згідно рівняння (2.12).

Загальний вигляд розрахункової функції потужності нових центрів грануляції наведено на рис. 2.2, крива II.

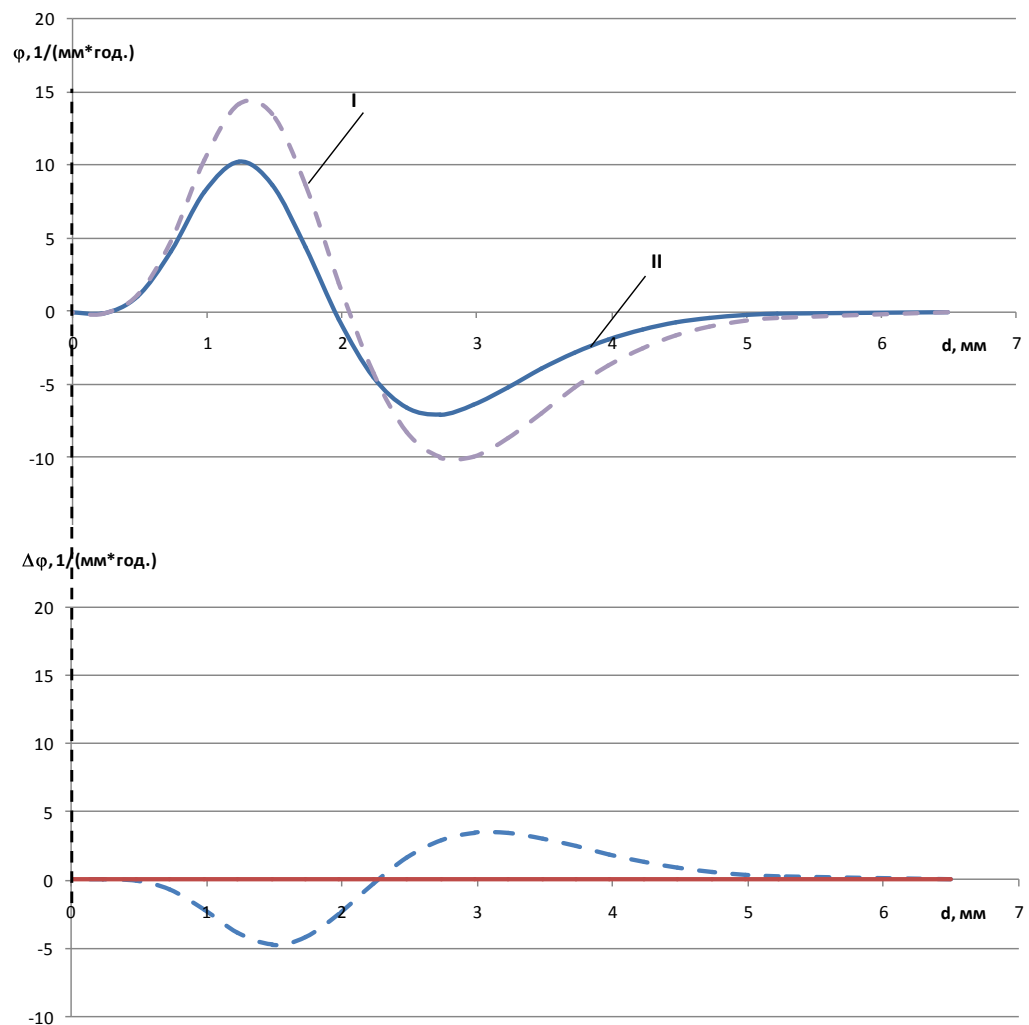


Рисунок 2.2 – а) Функції джерела і стоку експериментальна I та розрахункова II  
б) компенсаційна функція  $\Delta\phi = f(d)$  для мінерально-гумінових композитів

У випадку достатньої потужності внутрішнього джерела центрів грануляції, яке реалізується за рахунок подрібнення частинок,  $\Delta\phi=0$ . Крива I,

рис. 2.2, показує гіпотетичну експериментальну функцію потужності нових центрів грануляції, що має відхилення від розрахункової.

Якщо  $\Delta\varphi < 0$  – компенсаційна функція набуває від'ємних значень, рис. 2.2б) при  $0,8 \leq d \leq 2,2$  мм, тоді потужність внутрішнього джерела є недостатньою.

Додатні значення компенсаційної функції  $\Delta\varphi > 0$  показують надмірність утворення гранул з розмірами  $2,2 \leq d \leq 5$  мм, які необхідно вивести з апарату.

В залежності від вигляду і характеру функції  $\Delta\varphi$  можна зробити висновок щодо стабілізації дисперсного складу частинок в псевдозрідженому шарі.

Попередніми дослідженнями встановлено, що масове розподілення гранул в апараті з вірогідністю 0,95 описується гамма-розподіленням [38] в діапазоні зміни еквівалентного діаметра від 0,5 до 3,5 мм:

$$g = \frac{z^n}{(n-1)!} D^{*n-1} e^{-zD^*} \quad (2.16)$$

де  $z, n$  - параметри гама-розподілення;  $D^* = D - D_{\text{вин}}$ ,  $D_{\text{вин}}$  – граничний діаметр часточок, що виносяться із шару (апарату). [39]

Для розв'язання рівняння (2.13) необхідно визначити дослідним шляхом функцію масового розподілення  $g$ , функцію сепарації  $S$ , лінійну швидкість росту гранул  $A$ , та коефіцієнт гранулоутворення  $\psi$ .

### 2.3 Оцінка ефективності процесу

Процес одержання твердих композитів з рідких систем при наявності фазового переходу пов'язаний із значними витратами енергії. Тому ефективність процесу визначається двома параметрами: коефіцієнтом гранулоутворення  $\psi$  та відповідністю дисперсним складом одержаного продукту.

Коефіцієнт гранулоутворення визначається за виразом:

$$\psi = \frac{G_{\text{пр}}}{G_{\text{м}}},$$

де  $G_{\text{пр}}$  – масова продуктивність гранульованого продукту, кг/год.;

$G_M$  – кількість матеріалу, що надходить до апарату з вихідним розчином за одиницю часу, кг/год.

Оцінка відповідності дисперсного складу продукту заданому визначалась як функція втрат якості Тагучі [23].

Функція втрат Тагучі  $L(y)$  має вигляд [23, 24]:

$$L(y) = k (y-T)^2$$

де  $y$  – дійсне значення;  $T$  – цільове значення;  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

Отже, для оцінки відповідності дисперсного складу гранул при безперервному процесі гранулоутворення у псевдозрідженому шарі постає задача апроксимації поточних масових розподілів за діаметрами готового продукту. Для цього запропоновано для кожного моменту часу проводити апроксимацію за допомогою гамма-функції (2.16), що лінеаризується логарифмуванням у вигляді:

$$\ln g = \ln z - \ln(n-1)! + (n-1) \ln D^* - z D^* \quad (2.17)$$

Рівняння (2.17), розв'язане відносно діаметра, можна представити у вигляді:

$$\ln g = a_0 + a_1 \ln D^* + a_2 D^* \quad (2.18)$$

де  $a_0 = \ln z - \ln(n-1)!$ ,  $a_1 = n-1$ ,  $a_2 = -z$ ,

з якого методом найменших квадратів визначають коефіцієнти гамма-розподілення  $n$  і  $z$ :

$$g_T = \frac{z^{n_T}}{(n_T - 1)!} D^{*(n_T-1)} \cdot e^{-z_T D^*},$$

Тобто, динаміка зміни масового розподілення гранул за розмірами буде відрізнятися тільки значеннями коефіцієнтів  $n_Y$  і  $z_Y$ :

$$g_Y = \frac{z^{n_Y}}{(n_Y - 1)!} D^{*(n_Y-1)} \cdot e^{-z_Y D^*},$$

Отже, ступінь відхилення поточного масового розподілення від заданого буде визначатися різними значеннями коефіцієнтів гамма-розподілення.

В загальному випадку можна записати модифіковану функцію втрат якості дисперсного складу у вигляді:

$$L = k_1(z_y - z_T)^2 + k_2(n_y - n_T)^2, \quad (2.18)$$

де  $z_y$ ,  $z_T$ ,  $n_y$ ,  $n_T$  – відповідно фактичні та задані значення параметрів  $\gamma$ -розподілення,  $k_1$ ,  $k_2$  – коефіцієнти впливу, де фактичні значення визначені за результатами експериментальних досліджень.

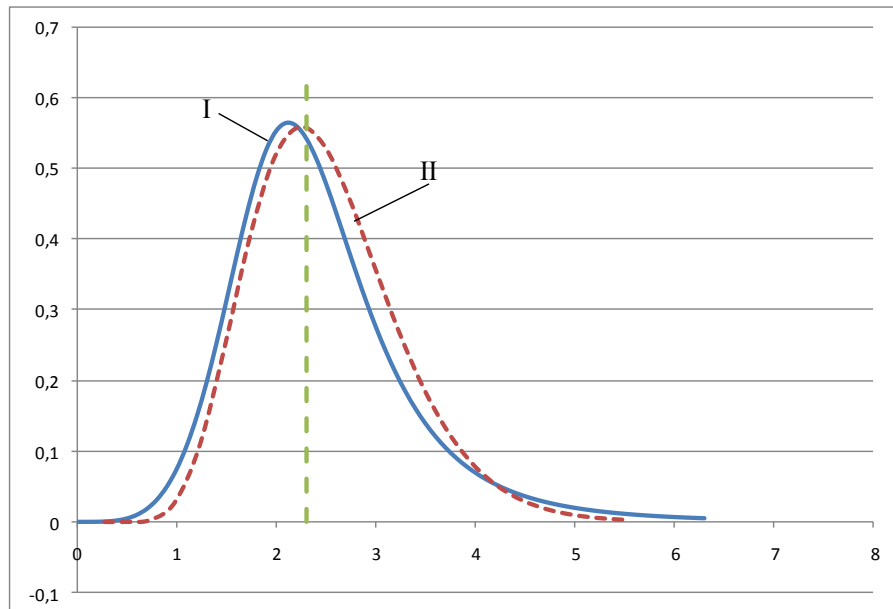
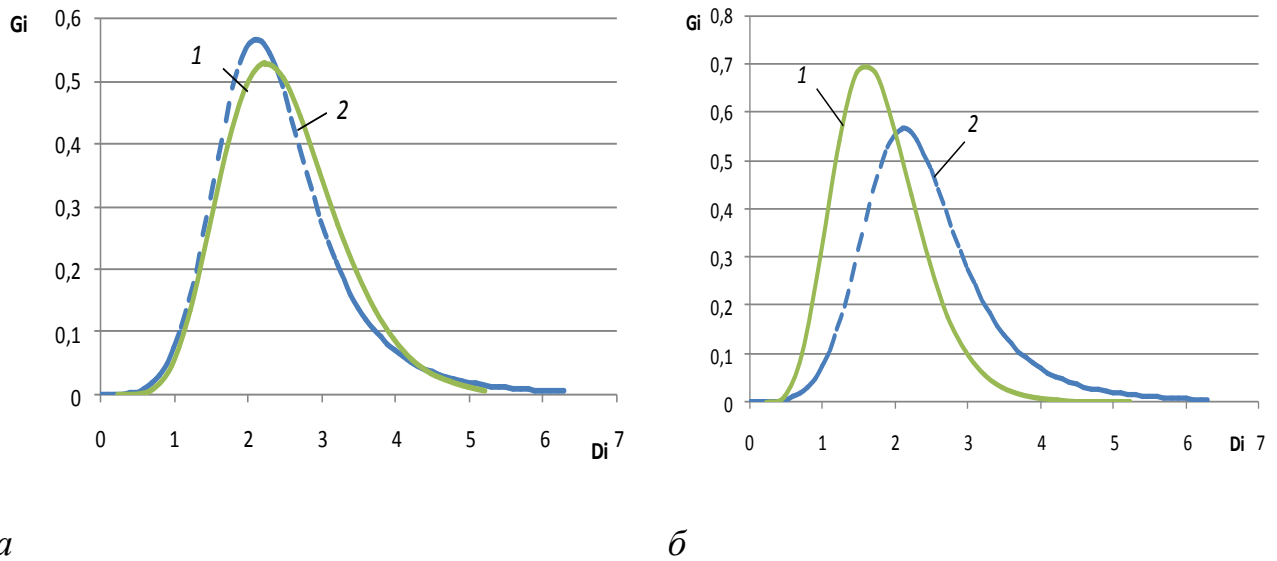


Рисунок 2.3 – Заданий розподіл продукту I в інтервалі 1,0 – 4,0 та його апроксимація гамма-функцією II ( $n_T = 9$ ,  $z_T = 3,9$ ).

Коефіцієнти впливу функції втрат якості, виходячи з теорії, повинні давати в сумі одиницю. Для визначення їх можливо застосувати наступний алгоритм:

1. Визначити вплив відхилення розподілення гранул за діаметром від заданого при зміні коефіцієнта  $n$  на одиницю.
2. Визначити вплив відхилення розподілення гранул за діаметром від заданого при зміні коефіцієнта  $z$  на одиницю.
3. Обрахувати значення  $\Delta_i = g_3(D) - g_n(D)$ , де  $g_3(D)$  відповідає заданому розподіленню,  $g_n(D)$  – поточне розподілення для отриманих  $n$  та  $z$ .
4. Визначити величину зміни  $\Delta_{np} = |\Delta_i - \Delta_{i+1}|$ .
5. За усередненою величиною різниці  $\Delta_{np}$  при зміні  $n$  та  $z$  визначити коефіцієнти впливу для розрахунку функції Тагучі.

Результати розрахунків наведено в таблиці 2.1 та на рисунку 2.4.



1 – розподілення, отримане при зміні коефіцієнту, 2 – задане розподілення *a* – вплив коефіцієнта *z*, *б* – вплив коефіцієнта *n* на масові розподіли гранул за діаметром.

Рисунок 2.4 – До розрахунку коефіцієнтів впливу функції *L*

Таблиця 2.1 – Розрахунок коефіцієнтів впливу на апроксимацію масового розподілення

<i>n</i>	9	10	11	12	13	14	15	16
<i>g(D)</i>	0,399666	0,399148	0,398037	0,39587	0,391997	0,385608	0,37582	0,3618
$\Delta_{iN}$	0,59414	0,594658457	0,595769	0,597936	0,601809	0,608198	0,61798	0,6319
$\Delta_{npN}$	0,000518	0,001111	0,002167	0,003873	0,006389	0,009785	0,01398	
<i>z</i>	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>g(D)</i>	0,399666	0,399992	0,400001	0,400006	0,400014	0,400026	0,40003	0,4000
$\Delta_{iz}$	0,59414	0,593814457	0,593805	0,5938	0,593792	0,59378	0,59377	0,5938
$\Delta_{npz}$	0,000326	$9 \cdot 10^{-6}$	$5E \cdot 10^{-6}$	$8E \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$	

Середня величина  $\Delta_{np}$  для зміни коефіцієнта *n* була отримана  $\Delta_{npN} = 0,005404$ , а для зміни коефіцієнта *z*  $\Delta_{npz} = 5,64286 \cdot 10^{-5}$

Тому, виходячи з порядків коефіцієнтів  $\Delta_{npN}$  та  $\Delta_{npz}$  отримаємо коефіцієнти  $k_1 = 0,25$ ,  $k_2 = 0,75$ .



### **3 ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ МІНЕРАЛЬНО-ГУМІНОВИХ КОМПОЗИТИВ В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ**

#### **3.1 Застосування нечіткої логіки для моделювання процесу**

##### **3.1.1 Основи нечіткої логіки**

Побудова моделей наближених роздумів людини і використання їх у комп'ютерних системах представляє сьогодні одну з найважливіших проблем науки.

Основи нечіткої логіки були закладені наприкінці 60-х років у працях відомого американського математика Латфі Заде. Соціальне замовлення на дослідження подібного роду було викликано зростаючим незадоволенням експертними системами. "Штучний інтелект", що легко справлявся із задачами керування складними технічними комплексами, був безпорадним при найпростіших висловленнях повсякденного життя. Для створення дійсно інтелектуальних систем, здатних адекватно взаємодіяти з людиною, необхідний був новий математичний апарат, що переводить невизначені і неоднозначні життєві твердження в мову чітких і формальних математичних формул.

Першим серйозним кроком у цьому напрямку з'явилася теорія нечітких множин, розроблена Заде. Його робота "Fuzzy Sets", що з'явилася в 1965 році в журналі "Information and Control", заклала основи моделювання інтелектуальної діяльності людини і з'явилася початковим поштовхом до розвитку нової математичної теорії. Він же дав і назву для нової області науки - "fuzzy logic" (fuzzy – нечіткий, розмитий, м'який).

Подальші роботи професора Л.Заде і його послідовників заклали міцний фундамент нової теорії і створили передумови для впровадження методів нечіткого управління в інженерну практику.

Апарат теорії нечітких множин, продемонструвавши ряд багатообіцяючих можливостей застосування - від систем керування літальними апаратами до прогнозування підсумків виборів, виявився разом з тим надмірно

складним для втілення, враховуючи наявний на той час рівень технології - і на багато років нечітка логіка зайняла своє місце в ряді інших спеціальних наукових дисциплін - десь посередині між експертними системами і нейронними мережами.

Своє друге народження теорія нечіткої логіки пережила на початку вісімдесятих років, коли відразу кілька груп дослідників, зокрема в США і Японії, зайнялися створенням електронних систем різного застосування, що використовують нечіткі керуючі алгоритми. Теоретичні основи для цих спроб були закладені в ранніх працях Коско й інших учених.

Третій період почався з кінця 80-х років і дотепер. Цей період характеризується бумом практичного застосування теорії нечіткої логіки в різних сферах науки і техніки. До 90-го року з'явилося близько 40 патентів, що відносяться до нечіткої логіки (30 - японських). Сорок вісім японських компаній утворили спільну лабораторію LIFE (Laboratory for International Fuzzy Engineering), японський уряд фінансував 5-річну програму по нечіткій логіці, що включає 19 різних проектів - від систем оцінки глобального забруднення атмосфери і передбачення землетрусів до АСУ заводських цехів і складів. Результатом виконання цієї програми з'явилася поява цілого ряду нових масових мікрочіпів, заснованих на нечіткій логіці. Сьогодні їх можна знайти в пральних машинах і відеокамерах, цехах заводів і моторних відсіків автомобілів, у системах керування складськими роботами і бойовими вертольотами.

У США розвиток нечіткої логіки йде по шляху створення систем, що потрібні великому бізнесу і військовим. Нечітка логіка застосовується при аналізі нових ринків, біржовій грі, оцінці політичних рейтингів, виборі оптимальної цінової стратегії і т.п. З'явилися і комерційні системи масового застосування.

### **3.1.2 Нечіткі множини**

Нехай  $E$  - універсальна множина,  $x$  - елемент  $E$ , а  $R$  - певна властивість. Звичайна (чітка) підмножина  $A$  універсальної множини  $E$ , елементи якої

задовольняють властивості  $R$ , визначається як множина впорядкованої пари  $A = \{m_A(x)/x\}$ , де  $m_A(x)$  - характеристична функція, що приймає значення 1, якщо  $x$  задовольняє властивості  $R$ , і 0 - в іншому випадку.

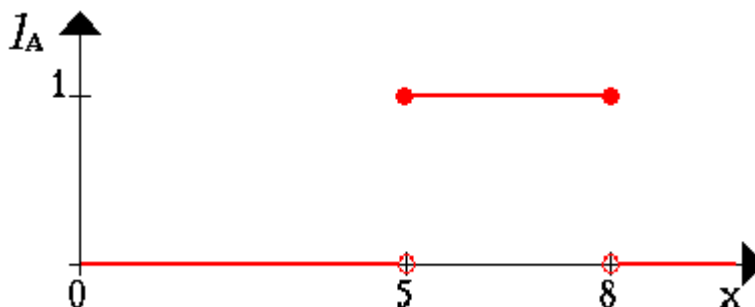
Нечітка підмножина відрізняється від звичайної тім, що для елементів  $x$  з  $E$  немає однозначної відповіді "ні" відносно властивості  $R$ . У зв'язку з цим, нечітка підмножина  $A$  універсальної множини  $E$  визначається як множина впорядкованої пари  $A = \{m_A(x)/x\}$ , де  $m_A(x)$  - характеристична функція приналежності (або просто функція приналежності), що приймає значення в деякій впорядкованій множині  $M$  (наприклад,  $M = [0,1]$ ).

Функція приналежності вказує ступінь (або рівень) приналежності елемента  $x$  до підмножини  $A$ . Множина  $M$  називають множиною приналежностей. Якщо  $M = \{0,1\}$ , тоді нечітка підмножина  $A$  може розглядатися як звичайна або чітка множина.

Розглянемо множину  $X$  всіх чисел від 0 до 10. Визначимо підмножину  $A$  множини  $X$  всіх дійсних чисел від 5 до 8.

$$A = [5,8]$$

Покажемо функцію приналежності множини  $A$ , ця функція ставить у відповідність число 1 чи 0 кожному елементу в  $X$ , у залежності від того, належить даний елемент підмножині  $A$  чи ні. Результат представлений на наступному рисунку:



Можна інтерпретувати елементи, яким поставлена у відповідність 1, як елементи, що знаходяться в множині  $A$ , а елементи, яким поставлений у відповідність 0, як елементи, що не знаходяться в множині  $A$ .

Ця концепція використовується в багатьох областях застосувань. Але можна легко знайти ситуації, в яких даній концепції буде бракувати гнучкості.

У даному прикладі опишемо множину молодих людей. Більш формально можна записати так

$$B = \{\text{множина молодих людей}\}$$

Оскільки, взагалі, вік починається з 0, то нижня межа цієї множини повинна бути нулем. Верхню межу визначити небагато складніше. Спочатку встановимо верхню межу, скажемо, рівну 20 рокам. Таким чином, маємо  $B$  як чітко обмежений інтервал, буквально:  $B=[0,20]$ . Виникає питання: чому хтось у свій двадцятирічний ювілей - молодий, а відразу наступного дня вже не молодий? Очевидно, це структурна проблема, і якщо пересунути верхню межу в довільну точку, то можна задати таке ж питання.

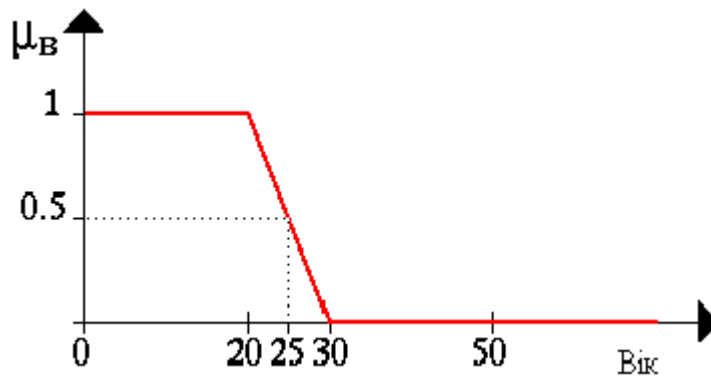
Більш природний шлях отримання множини  $B$  складається в ослабленні строгого поділу на молодих і не молодих. Зробимо це, вносячи не тільки чіткі судження Так, він належить множини молодих людей або Ні, вона не належить множини молодих людей, але і більш гнучкі формулювання ТАК, він належить до досить молодих людей або Ні, він не дуже молодий.

Розглянемо як за допомогою нечіткої множини визначити такий вираз, як він ще молодий.

В першому прикладі ми кодували всі елементи множини за допомогою 0 чи 1. Простим способом узагальнити дану концепцію є введення значення між 0 і 1. Реально можна навіть допустити нескінченне число значень між 0 і 1, в одиничному інтервалі  $I = [0, 1]$ .

Інтерпретація чисел при співвідношенні всіх елементів множини стає тепер більш складною. Звичайно, знову число 1 ставиться у відповідність тому елементу, що належить множині  $B$ , а 0 означає, що елемент точно не належить множині  $B$ . Всі інші значення визначають ступінь приналежності до множини  $B$ .

Для наочності приведемо характеристичну функцію множини молодих людей, як і в першому прикладі.



Нехай  $E = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ ,  $M = [0,1]$ ;  $A$  - нечітка множина, для якої  $m_A(x_1)=0,3$ ;  $m_A(x_2)=0$ ;  $m_A(x_3)=1$ ;  $m_A(x_4)=0,5$ ;  $m_A(x_5)=0,9$

Тоді  $A$  можна представити у виді:

$A = \{0,3/x_1; 0/x_2; 1/x_3; 0,5/x_4; 0,9/x_5\}$  або

$A = 0,3/x_1 + 0/x_2 + 1/x_3 + 0,5/x_4 + 0,9/x_5$ ,

(знак "+" є операцією не додавання, а об'єднання) або

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$A =$	0,3	0	1	0,5	0,9

### 3.1.3 Основні характеристики нечітких множин

Нехай  $M = [0,1]$  і  $A$  - нечітка множина з елементами з універсальної множини  $E$  і множиною приналежностей  $M$ .

- Величина  $\sup_{x \in E} m_A(x)$  називається **висотою** нечіткої множини  $A$ . Нечітка множина  $A$  є нормальною, якщо її висота дорівнює 1, тобто верхня границя її функції приналежності дорівнює 1 ( $m_A(x)=1$ ). При  $m_A(x)<1$  нечітка множина називається **субнормальною**.

- Нечітка множина є **порожньою**, якщо " $x \in E$   $m_A(x)=0$ ."
- Нечітка множина є **унімодальною**, якщо  $m_A(x)=1$  лише для одного  $x$  з  $E$ .

- **Носієм** нечіткої множини  $A$  є звичайна підмножина з властивістю  $m_A(x)>0$ , тобто носій  $A = \{x/m_A(x)>0\}$  " $x \in E$ ."

- Елементи  $x \in E$ , для яких  $m_A(x)=0,5$  називаються **точками переходу** множини  $A$ .

### 3.1.4 Приклади нечітких множин

1. Нехай  $E = \{0,1,2,\dots,10\}$ ,  $M = [0,1]$ . Нечітку множину "кілька" можна визначити таким чином: "кілька" =  $0,5/3+0,8/4+1/5+1/6+0,8/7+0,5/8$ ;

її характеристики: висота = 1, носій =  $\{3,4,5,6,7,8\}$ , точки переходу -  $\{3,8\}$ .

2. Нехай  $E = \{0,1,2,3,\dots,n,\dots\}$ . Нечітку множину "малий" можна визначити:

$$\text{"малий"} = \left\{ \mu_{\text{"малий"}}(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{10}\right)^2} \right\}$$

3. Нехай  $E = \{1,2,3,\dots,100\}$  і відповідає поняттю "якість", тоді нечітку множину "гарна", можна визначити за допомогою  $\mu_{\text{"гарна"}}(x)$

$$= \begin{cases} 1, & x \in [1,25] \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{x-25}{5}\right)^2}, & x \geq 25 \end{cases}$$

Нечітка множина "гарна" на універсальній множині  $E' = \{\text{Продукт1, продукт2}\dots\}$  задається за допомогою функції приналежності  $\mu_{\text{"гарна"}}(x)$  на  $E = \{1,2,3,\dots,100\}$  (якість), що називається відносно  $E'$  функцією сумісності, при цьому:

$$\mu_{\text{"якість"}}(\text{Продукт1}) = \mu_{\text{"гарна"}}(x), \text{ де } x - \text{якість Продукту1.}$$

### 3.1.5 Методи побудови функцій приналежності нечітких множин

У приведених вище прикладах використані прямі методи, коли експерт або просто задає для кожного  $x \in E$  значення  $\mu_A(x)$ , або визначає функцію приналежності. Як правило, прямі методи завдання функції приналежності використовуються для вимірних понять, таких як швидкість, година, відстань, тиск, температура і т.д., тобто коли виділяються полярні значення.

У багатьох задачах при характеристиці об'єкта можна виділити набір ознак і для кожного з них визначити полярні значення, що відповідають значенням функції приналежності, 0 чи 1.

Наприклад, у задачі розпізнавання розрахунку теплообмінника можна виділити наступні пункти:

		0	1
x1	розміщення	вертикальний	горизонтальний
x2	температурна схема	прямотечійний	протитечійний
x3	вид тепловіддачі	випаровування/ конденсація	нагрів/ охолодження
x4	вигляд обтікання	повздожний	поперечний

Для конкретного обличчя  $A$  експерт, виходячи з приведеної шкали, задає  $m_A(x) \in [0,1]$ , формуючи векторну функцію приналежності  $\{m_A(x_1), m_A(x_2), \dots, m_A(x_4)\}$ .

Непрямі методи визначення значень функції приналежності використовуються у випадках, коли немає елементарних вимірних властивостей, через які визначається потрібна нечітка множина. Як правило, це методи попарних порівнянь. Якби значення функцій приналежності були нам відомі, наприклад,  $m_A(x_i) = w_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$ , тоді попарні порівняння можна представити матрицею відношень  $A = \{a_{ij}\}$ , де  $a_{ij} = w_i/w_j$  (операція ділення).

### 3.1.6 Операції над нечіткими множинами

#### Вміщення

Нехай  $A$  і  $B$  - нечіткі множини на універсальній множині  $E$ .

Говорять, що  $A$  міститься в  $B$ , якщо  $\forall x \in E \ m_A(x) \leq m_B(x)$ .

Позначення:  $A \subseteq B$ .

Іноді використовують термін "домінування", тобто у випадку коли  $A \subseteq B$ , говорять, що  $B$  домінує  $A$ .

#### Рівність

$A$  і  $B$  рівні, якщо  $\forall x \in E \ m_A(x) = m_B(x)$ .

Позначення:  $A = B$ .

### Доповнення

Нехай  $M = [0,1]$ ,  $A$  і  $B$  - нечіткі множини, задані на  $E$ .  $A$  і  $B$  доповнюють один одного, якщо

$$\forall x \in E \quad m_A(x) = 1 - m_B(x).$$

Позначення:  $B = \bar{A}$  чи  $A = \bar{B}$

Очевидно, що  $\bar{\bar{A}} = A$ . (Доповнення визначене для  $M = [0,1]$ , але очевидно, що його можна визначити для будь-якого впорядкованого  $M$ ).

### Перетинання

$A \cap B$  - найбільша нечітка підмножина, що міститься одночасно в  $A$  і  $B$ .

$$m_{A \cap B}(x) = \min(m_A(x), m_B(x)).$$

### Об'єднання

$A \cup B$  - найменша нечітка підмножина, що включає як  $A$ , так і  $B$ , з функцією приналежності:

$$m_{A \cup B}(x) = \max(m_A(x), m_B(x)).$$

### Різниця

$A - B = A \cap \bar{B}$  з функцією приналежності:

$$m_{A-B}(x) = m_{A \cap \bar{B}}(x) = \min(m_A(x), 1 - m_B(x)).$$

### Диз'юнктивна сума

$A \oplus B = (A - B) \cup (B - A) = (A \cap \bar{B}) \cup (\bar{A} \cap B)$  з функцією приналежності:

$$m_{A \oplus B}(x) = \max\{\min\{m_A(x), 1 - m_B(x)\}; \min\{1 - m_A(x), m_B(x)\}\}$$

### Приклади

Нехай:

$$A = 0,4/x_1 + 0,2/x_2 + 0/x_3 + 1/x_4;$$

$$B = 0,7/x_1 + 0,9/x_2 + 0,1/x_3 + 1/x_4;$$

$$C = 0,1/x_1 + 1/x_2 + 0,2/x_3 + 0,9/x_4.$$

Тут:

1.  $A \cap B$ , тобто  $A$  міститься в  $B$  чи  $B$  домінує  $A$ ,  $C$  незрівнянно ні з  $A$ , ні з  $B$ , тобто парі  $\{A, C\}$  і  $\{A, B\}$  - парі не домінуємих нечітких множин.



2.  $A \cap B \cap C$ .

$$3. \bar{A} = 0,6/x_1 + 0,8/x_2 + 1/x_3 + 0/x_4;$$

$$\bar{B} = 0,3/x_1 + 0,1/x_2 + 0,9/x_3 + 0/x_4.$$

$$4. A \cup B = 0,4/x_1 + 0,2/x_2 + 0/x_3 + 1/x_4.$$

$$5. A \cap C = 0,7/x_1 + 0,9/x_2 + 0,1/x_3 + 1/x_4.$$

$$6. A - C = A \cap \bar{C} = 0,3/x_1 + 0,1/x_2 + 0/x_3 + 0/x_4;$$

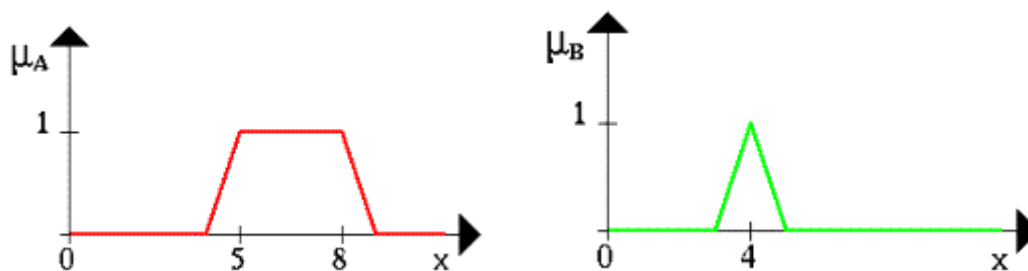
$$B - A = \bar{A} \cap B = 0,6/x_1 + 0,8/x_2 + 0,1/x_3 + 0/x_4.$$

$$7. A \oplus B = 0,6/x_1 + 0,8/x_2 + 0,1/x_3 + 0/x_4.$$

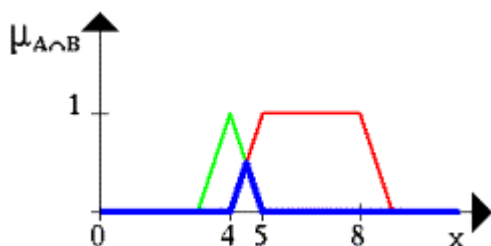
### 3.1.7 Наочне представлення операцій над нечіткими множинами

Для нечітких множин можна будувати візуальне представлення. Розглянемо прямокутну систему координат, на осі ординат якої відкладаються значення  $\mu_A(x)$ , на осі абсцис у довільному порядку розташовані елементи  $E$  (мі вже використовували таке представлення в прикладах нечітких множин). Якщо  $E$  по своїй природі впорядковано, те цей порядок бажано зберегти в розташуванні елементів на осі абсцис. Таке представлення робить наочними прості операції над нечіткими множинами.

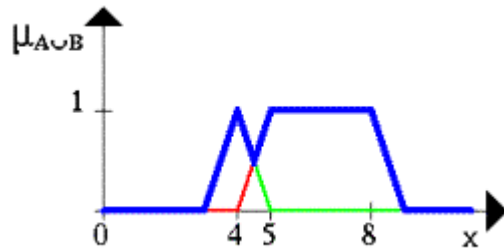
Нехай  $A$  нечіткий інтервал між 5 до 8 і  $B$  нечітке число близько 4, як показано на рисунку.



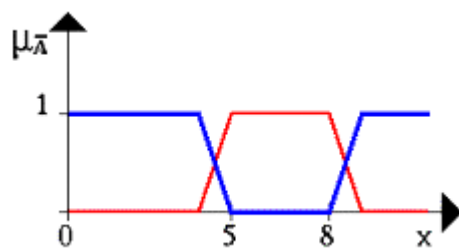
Проілюструємо нечітку множину між 5 і 8 і (AND) близько 4 (синя лінія).



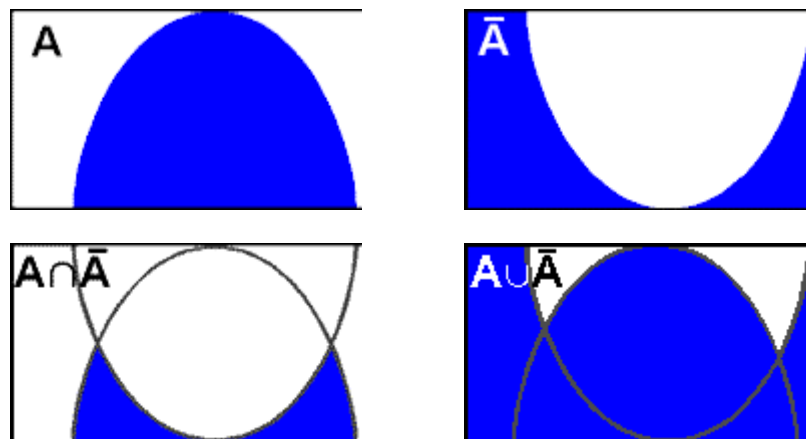
Нечітка множина між 5 і 8 АБО (OR) близько 4 показана на наступному рисунку (знову синя лінія).



Наступний малюнок ілюструє операцію заперечення. Синя лінія - це ЗАПЕРЕЧЕННЯ нечіткої множини А.



В наступному рисунку заштрихована частина відповідає нечіткій множині А і зображує область значень А і всіх нечітких множин, що містяться в А. Решта рисунків зображують відповідно  $\bar{A}$ ,  $A \cap \bar{A}$ ,  $A \cup \bar{A}$ .



### Властивості операцій И і З

Нехай А, В, С - нечіткі множини, тоді виконуються наступні властивості:

- $\left. \begin{array}{l} A \cap B = B \cap A \\ A \cup B = B \cup A \end{array} \right\}$  - комутативність;
- $\left. \begin{array}{l} (A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C) \\ (A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C) \end{array} \right\}$  - асоціативність;

- $\left. \begin{array}{l} A \cap A = A \\ A \cup A = A \end{array} \right\}$  - ідемпотентність;
- $\left. \begin{array}{l} A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C) \\ A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C) \end{array} \right\}$  - дистрибутивність;
- $A \cap \emptyset = \emptyset$ , де  $\emptyset$  - порожня множина, тобто  $m_{\emptyset}(x) = 0 \ \forall x \in E$ ;
- $A \cap \emptyset = \emptyset$ ;
- $A \cap E = A$ , де  $E$  - універсальна множина;
- $A \cap E = E$ ;
- $\left. \begin{array}{l} \overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B} \\ \overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B} \end{array} \right\}$  - теореми де Моргана.

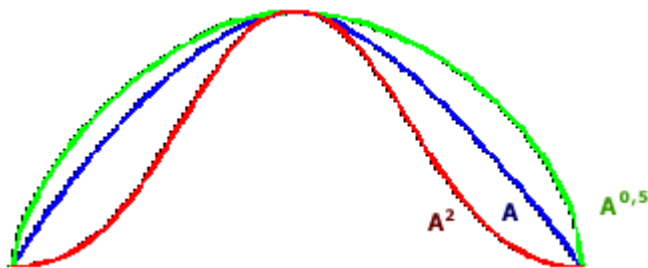
На відміну від чітких множин, для нечітких множин у загальному випадку:

- $A \cap \overline{A} \neq \emptyset$ ,
- $A \cap \overline{A} \neq E$ .

(Що, зокрема, проілюстровано вище в прикладі наочного представлення нечітких множин).

- $\text{CON}(A) = A^2$  - операція концентрування,
- $\text{DIL}(A) = A^{0,5}$  - операція розмиття,

які використовуються при роботі з лінгвістичними змінними.



### Множення на число

Якщо  $a$  - позитивне число, таке, що  $a \cdot \max_{x \in A} m_A(x) \leq 1$ , тоді нечітка множина  $aA$  має функцію приналежності:

$$m_{aA}(x) = a \cdot m_A(x).$$

### 3.1.8 Нечітка і лінгвістична змінні

При описі об'єктів і явищ за допомогою нечітких множин використовується поняття нечіткої і лінгвістичної змінних.

Нечітка змінна характеризується трійкою  $\langle a, X, A \rangle$ , де

- $a$  - найменування змінної,
- $X$  - універсальна множина (область визначення  $a$ ),
- $A$  - нечітка множина на  $X$ , що описує обмеження (тобто  $m A(x)$ ) на

значення нечіткої змінної  $a$ .

Лінгвістичною змінною називається набір  $\langle b, T, X, G, M \rangle$ , де

- $b$  - найменування лінгвістичної змінної;
- $T$  - множина її значень (терм-множина), що представляють собою

імена нечітких змінних, областю визначення, кожної з яких є множина  $X$ .

Множина  $T$  називається базовою терм-множиною лінгвістичної змінної;

- $G$  - синтаксична процедура, що дозволяє оперувати елементами терм-множини  $T$ , зокрема, генерувати нові терми (значення). Множина  $TIG(T)$ , де  $G(T)$  - множина згенерованих термів, називається розширеною терм-множиною лінгвістичної змінної;

- $M$  - семантична процедура, що дозволяє перетворити кожне нове значення лінгвістичної змінної, утвореною процедурою  $G$ , у нечітку змінну, тобто сформувати відповідну нечітку множину.

Щоб уникнути великої кількості символів:

- символ  $b$  використовують як для назви самої змінної, так і для всіх її значень;
- для позначення нечіткої множини і його назви користуються одним символом, наприклад, терм "молодий", що є значенням лінгвістичної змінної  $b = \text{"вік"}$ , одночасно є і нечіткою множиною  $M$  ("молодий").

Присвоєння декількох значень символу припускає, що контекст дозволяє робити можливі невизначеності.

### **Приклад**

Нехай експерт визначає товщину виробу, за допомогою поняття "мала товщина", "середня товщина" і "велика товщина", при цьому мінімальна товщина дорівнює 10 мм, а максимальна - 80 мм.

Формалізація такого опису може бути проведена за допомогою наступної лінгвістичної змінної  $\langle b, T, X, G, M \rangle$ , де

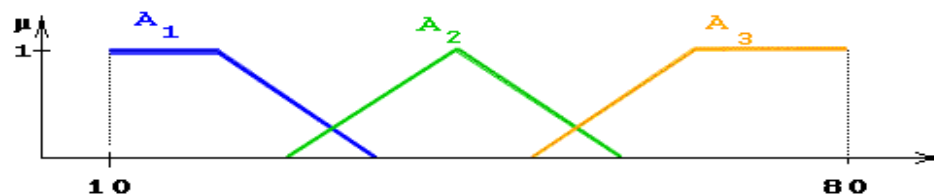
- $b$  - товщина виробу;
- $T$  - {"мала товщина", "середня товщина", "велика товщина"};
- $X$  - [10, 80];
- $G$  - процедура утворення нових термів за допомогою зв'язувань "і", "або" і модифікаторів типу "дуже", "не", "злегка" і ін. Наприклад, "мала або середня товщина", "дуже мала товщина" і ін.;

- $M$  - процедура завдання на  $X = [10, 80]$  нечітких підмножин  $A_1$ ="мала товщина",  $A_2$  = "середня товщина",  $A_3$ ="велика товщина", а також нечітких множин для термів з  $G(T)$  відповідно до правил трансляції нечітких зв'язувань і модифікаторів "і", "або", "не", "дуже", "злегка" і ін. операції над нечіткими множинами виду:  $A \text{ З } C$ ,  $A \text{ И } C$ ,  $\bar{A}$ ,  $\text{CON } A = A^2$ ,  $\text{DIL } A = A^{0.5}$  і ін.

Разом із розглянутими вище базовими значеннями лінгвістичної змінної "товщина" ( $T=\{"мала товщина", "середня товщина", "велика товщина"\}$ ) існують можливі значення, що залежать від області визначення  $X$ . У даному випадку значення лінгвістичної змінної "товщина виробу" можуть бути визначені як "близько 20 мм", "близько 50 мм", "близько 70 мм", тобто у вигляді нечітких чисел.

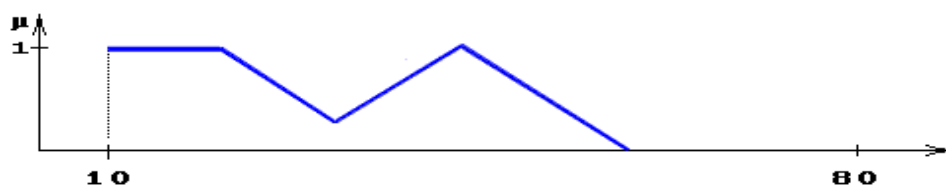
### 3.1.9 Функції приналежності нечітких множин:

"мала товщина" =  $A_1$ , "середня товщина" =  $A_2$ , "велика товщина" =  $A_3$ .



Функція приналежності:

нечітка множина "мала чи середня товщина" =  $A_1 \text{ И } A_2$ .



### 3.1.9 Нечіткі висловлення і нечіткі моделі систем

Нечіткими висловленнями будемо називати висловлення наступного виду:

1. Висловлення  $\langle b \in b' \rangle$ , де  $b$  - найменування лінгвістичної змінної,  $b'$  - її значення, якому відповідає нечітка множина на універсальній множині  $X$ . Наприклад, висловлення  $\langle \text{тиск великий} \rangle$  припускає, що лінгвістичній змінній "тиск" надається значення "великий", для якого на універсальній множині  $X$  змінної "тиск" визначена, відповідно даному значенню "великий", нечітка множина.
2. Висловлення  $\langle b \in mb' \rangle$ , де  $m$  - модифікатор, якому відповідають слова "ДУЖЕ", "БІЛЬШ-МЕНШ", "НАБАГАТО БІЛЬШЕ" і ін. Наприклад:  $\langle \text{тиск дуже великий} \rangle$ ,  $\langle \text{швидкість набагато більше середньої} \rangle$  і ін.
3. Складні висловлення, утворені з висловлень видів 1. і 2. і союзів "І", "АБО", "ЯКЩО..., ТОДІ...", "ЯКЩО..., ТОДІ..., ІНАКШЕ".

### 3.1.10 Висловлення на множині значень фіксованої лінгвістичної змінної

Якщо значення фіксованої лінгвістичної змінної відповідають нечітким множинам однієї універсальної множини  $X$ , можна ототожнювати модифікатори "дуже" чи "не" з операціями "CON" і "доповнення", а союзи "І", "АБО" з операціями "перетинання" і "об'єднання" над нечіткими множинами.

Для ілюстрації поняття лінгвістичної змінної ми як приклад розглядали лінгвістичну змінну "товщина виробу" з базовою терм-множиною  $T = \{\text{"мала", "середня", "велика"}\}$ . При цьому на  $X = [10, 80]$  ми визначили нечіткі множини  $A_1, A_2, A_3$ , що відповідають базовим значенням: "мала", "середня", "велика".

У цьому випадку висловленню  $\langle \text{товщина виробу дуже мала} \rangle$  відповідає нечітка множина  $CONA = A_2$ ; висловленню  $\langle \text{товщина виробу не велика або середня} \rangle$  - нечітка множина  $A_2 \cap \bar{A}_3$ ; висловленню  $\langle \text{товщина виробу не мала і не велика} \rangle$   $A_1 \cap \bar{A}_3$ .

### 3.1.11 Нечіткі множини в системах керування

Найбільш важливим застосуванням теорії нечітких множин є контролери нечіткої логіки. Їх функціонування дещо відрізняється від роботи звичайних контролерів; для опису системи замість диференціальних рівнянь використовуються знання експертів. Ці знання можуть бути виражені за допомогою лінгвістичних змінних, які описані нечіткими множинами.

### 3.1.12 Загальна структура нечіткого мікроконтролера

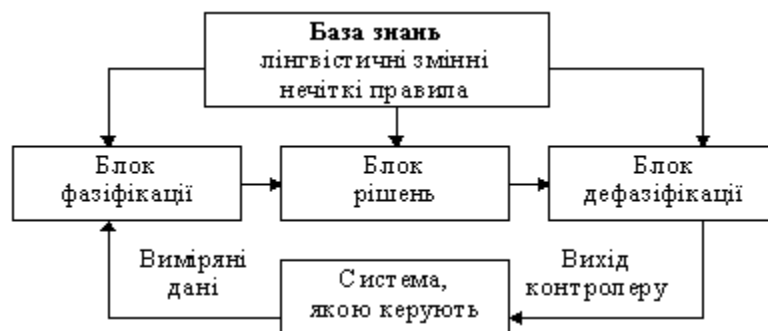
Загальна структура мікроконтролера, що використовує нечітку логіку, показана на рис. 1. Вона містить у своєму складі наступні складові:

- блок фазифікації;
- базу знань;
- блок рішень; блок дефазифікації.

Блок фазифікації перетворює чіткі величини, виміряні на виході об'єкта керування, у нечіткі величини, що описані лінгвістичними змінними в базі знань.

Блок рішень використовує нечіткі умовні ( if - then ) правила, закладені в базі знань, для перетворення нечітких вхідних даних у необхідні керуючі впливи, що носять також нечіткий характер.

Блок дефазифікації перетворює нечіткі дані з виходу блоку рішень у чітку величину, що використовується для керування об'єктом.



Загальна структура нечіткого мікроконтролера

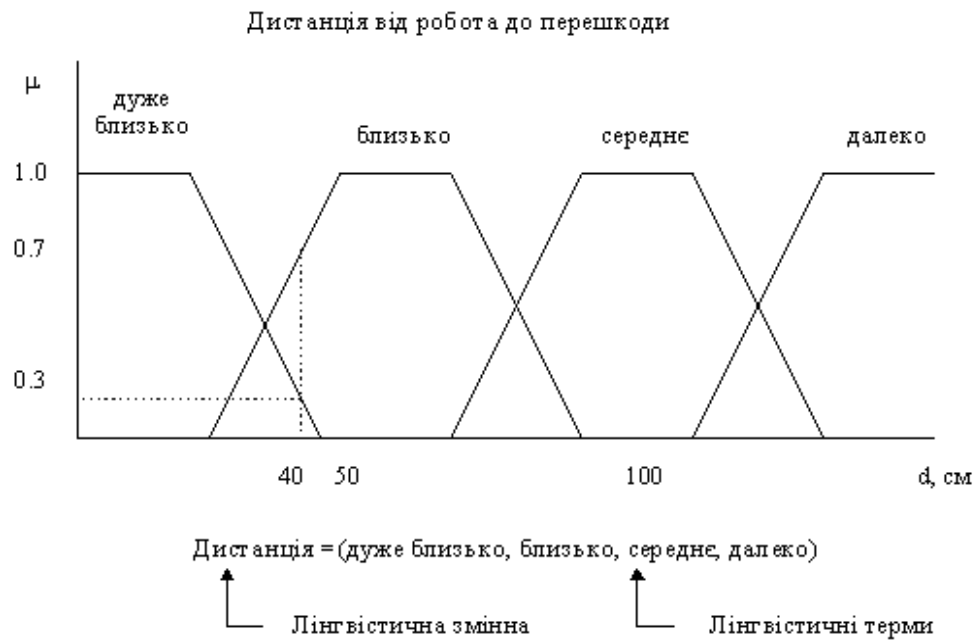
Як приклад відомих мікроконтролерів, що підтримують нечітку логіку можна назвати 68HC11, 68HC12 фірми Motorola, MCS-96 фірми Intel, а також деякі інші.

Всі системи з нечіткою логікою функціонують за одним принципом: показання вимірювальних приладів: фазифікуються (перетворюються в нечіткий формат), обробляються, дефазифікуються й у вигляді звичайних сигналів подаються на виконавчі пристрої.

Розглянемо випадок керування мобільним роботом, задачею якого є об'їзд перешкод. Введемо дві лінгвістичні змінні: ДИСТАНЦІЯ (відстань від робота до перешкоди) і НАПРЯМОК (кут між подовжньою віссю робота та напрямком на перешкоду).

Розглянемо лінгвістичну змінну ДИСТАНЦІЯ. Значеннями її можна визначити терми ДАЛЕКО, СЕРЕДНЕ, БЛИЗЬКО і ДУЖЕ БЛИЗЬКО. Для фізичної реалізації лінгвістичної змінної необхідно визначити точні фізичні значення термів цієї змінної. Нехай змінна ДИСТАНЦІЯ може приймати будь-які значення з діапазону від нуля до нескінченності. Відповідно до теорії нечітких множин, у такому випадку кожному значенню відстані з зазначеного діапазону може бути поставлене у відповідність деяке число від нуля до одиниці, що визначає ступінь приналежності даної фізичної відстані (припустимо 40 см) до того чи іншого терму лінгвістичної змінної ДИСТАНЦІЯ. Ступінь приналежності визначаємо функцією приналежності  $M(d)$ , де  $d$ -відстань до перешкоди. У нашому випадку відстані 40 см. Можна задати ступінь приналежності до терму ДУЖЕ БЛИЗЬКО рівним 0,7, а до терму БЛИЗЬКО - 0,3 (рис. 2.). Конкретне визначення ступеня приналежності може проходити тільки при роботі з експертами.





### Лінгвістична змінна і функція приналежності

Змінній НАПРЯМОК, яка може приймати значення в діапазоні від 0 до 360 градусів, задамо терми ЛІВИЙ, ПРЯМИЙ і ПРАВИЙ.

Тепер необхідно задати вихідні змінні. У даному прикладі достатньо однієї, яка назвемо РУЛЬОВИЙ КУТ. Вона може містити терми: РІЗКО ВЛІВО, ВЛІВО, ПРЯМО, ВПРАВО, РІЗКО ВПРАВО. Зв'язок між входом та виходом запам'ятовується в таблиці нечітких правил.

Таблиця нечітких правил

		дистанція			
		дуже близько	близько	середнє	далеко
напрямок	правий	різко вліво	різко вліво	вліво	прямо
	прямий	різко вліво	вліво	вліво	прямо
	лівий	різко вправо	різко вправо	вправо	прямо

Кожний запис у даній таблиці відповідає своєму нечіткому правилу, наприклад: Якщо дистанція близько і напрямок правий, тоді рульовий кут різко вліво

Таким чином, мобільний робот з нечіткою логікою буде працювати за наступним принципом: дані з сенсорів про відстань до перешкоди та напрямок до неї будуть фазіфіковані, оброблені згідно табличних правил, дефазіфіковані і дані, що отримані, у вигляді керуючих сигналів надходять на приводи робота.

### 3.1.13 Нечітка логіка в Matlab

Fuzzy logic toolbox - вбудована в Matlab сукупність функцій, що містить набір засобів, які дозволяють:

- створювати і редагувати нечіткі системи всередині середовища Matlab;
- вбудовувати нечітку підсистему в SimuLink (поставляється з Matlab) при моделюванні загальної системи;
- побудувати нечітку систему в Matlab у вигляді процедури, що викликається з програми, яка написана на мові Сі.

Даний набір інструментів забезпечує три категорії інструментальних засобів програмування нечітких систем:

- функції командного рядка (command line functions);
- графічний інтерактивний інтерфейс;
- використання вбудованих блоків SimuLink.

Перша категорія - готові функції, які можна викликати відразу з командного рядка Matlab. Практично усі вони являють собою m-файли, що містять послідовність виразів, що виконують спеціалізований нечіткий алгоритм. Для перегляду вихідного коду функцій необхідно набрати в командному рядку:

```
type ім'я_функції
```

Крім того, Matlab дозволяє їх модифікувати шляхом копіювання і перейменування відповідного файлу та наступного його редагування. Таким чином, нечіткий набір інструментів є розширеним власними функціями.

Друга категорія дозволяє отримати доступ до тих самих функцій через графічний користувальницький інтерфейс, за допомогою якого набагато зручніше конструювати й аналізувати нечіткі системи.

Третя категорія - моделювання в середовищі SimuLink. Тут підсистеми представляються у виді блоків - можна з'єднати будь-яким чином і відразу отримати результати.

У Matlab є багато вбудованих функцій приналежності, зокрема:

- сигмоїдальна;
- двостороння сигмоїдальна;
- гаусова;
- дзвіноподібної форми
- S-функція приналежності;
- Z-функція приналежності;
- трапецієподібна;
- трикутна й ін.

Усі дії над нечіткими числами задаються мінімальним набором функцій і відбуваються всередині програми. Таким чином, користувачу необов'язково вивчати усі тонкощі теорії нечітких множин, достатньо лише визначити усі вхідні і вихідні змінні і задати таблицю правил, а решту роботи робить Matlab. Дефазифікація виконується в один з п'ятих методів, зазначених програмістом. Крім того, можна вивести на екран відповідно до введених правил результуючі поверхні керування в залежності від комбінації входів, схему отриманої нечіткої програми, і це лише мала частина всіх можливостей даного набору інструментів.

### **3.1.14 Переваги нечітких систем**

Коротко перелічимо відмітні переваги fuzzy-систем у порівнянні з іншими:

- можливість оперувати вхідними даними, заданими нечітко: наприклад, що безупинно змінюються в часі значення (динамічні задачі), значення, що неможливо задати однозначно (результати статистичних опитувань, рекламні компанії, статистичних знань експертів в даній галузі тощо);

- можливість нечіткої формалізації критеріїв оцінки і порівняння: оперування критеріями "більшість", "можливе", "переважно" і т.д.;
- можливість проведення якісних оцінок як вхідних даних, так і виведених результатів: ви оперуєте не тільки власне значеннями даних, але їхнім ступенем вірогідності і її розподілом;
- можливість проведення швидкого моделювання складних динамічних систем і їхній порівняльний аналіз із заданим ступенем точності: оперуючи принципами поведінки системи, описаними fuzzy-методами, ви перше, не витрачаєте багато часу на з'ясування точних значень змінних і складання рівнянь, що їх описують, по-друге, можете оцінити різні варіанти вихідних значень.

### 3.2 Узагальнена модель утворення мінерально-гумінових добрив

Для забезпечення стійкої кінетики багатофакторного процесу утворення гуміново-мінеральних твердих композитів з вираженим стохастичним характером необхідно своєчасно змінювати технологічні параметри.

Моделі, запропоновані попередньо, не в повній мірі враховують природу процесу утворення мінерально-гумінових твердих композитних структур. Для врахування стохастичної природи процесу доцільно використовувати метод нечіткої логіки, який полягає у застосуванні нечітких множин і лінгвістичних змінних. Для цього використано середовище MatLab із додатком нечітких множин FuzzyLogicToolbox.

Враховуючи природу процесів, запропоновано в моделі виділити два блоки – *основний* і *проміжний*. Структуру моделі наведено на рисунку 4.33.

З урахуванням проведених комплексних досліджень, визначено такі базові вхідні параметри для *проміжного блоку*: масу завантаженого матеріалу ( $M_{in}$ ), число псевдозрідження ( $K_w$ ), температуру газового теплоносія ( $T_g$ ), еквівалентний діаметр початкових центрів грануляції ( $D_{enoch}$ ), витрати робочого розчину, що надходить до апарату ( $Q_p$ ) та його концентрацію ( $C_p$ ), рис. 3.1.

Вихідними змінними з *проміжного блоку* є: висота шару ( $H_{sh}$ ), температура ( $T_{sh}$ ) та поточний еквівалентний діаметр часток в шарі ( $D_{e,ш}$ ).

Ці параметри разом із параметрами масового  $\gamma$ -розподілення маси гранул за розмірами  $n$  і  $z$ , функцією потужності нових центрів грануляції  $dFi(D)$  та масою отриманого продукту  $G_{np}$  визначають коефіцієнт гранулоутворення ( $Psi$ ) і функцію якості гранульованого продукту ( $L$ ), рисунок 4.27.

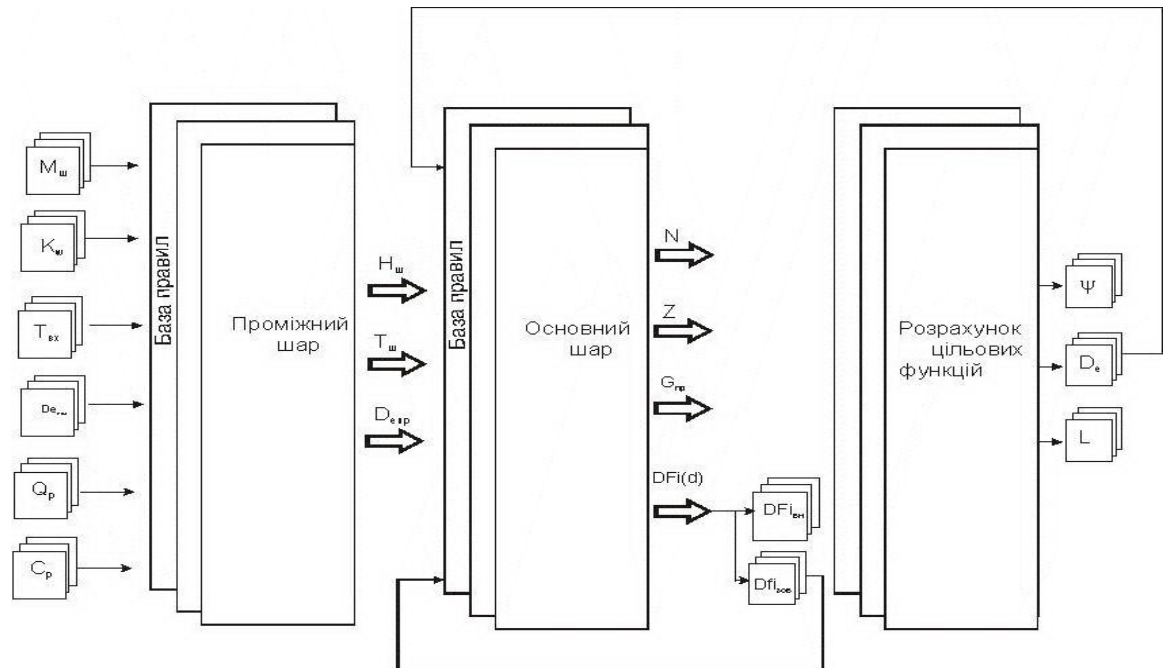


Рисунок 3.1 – Структура моделі зневоднення і гранулоутворення із застосуванням методу нечітких множин

Вхідні змінні моделі вибираються у вигляді функцій належності дзвіноподібної форми (*gbellmf*), рисунок 3.2.

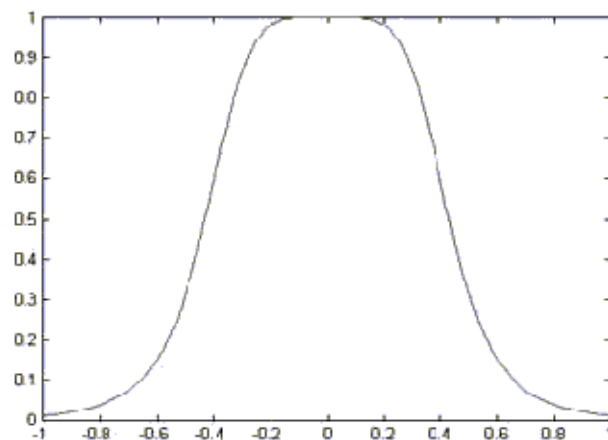
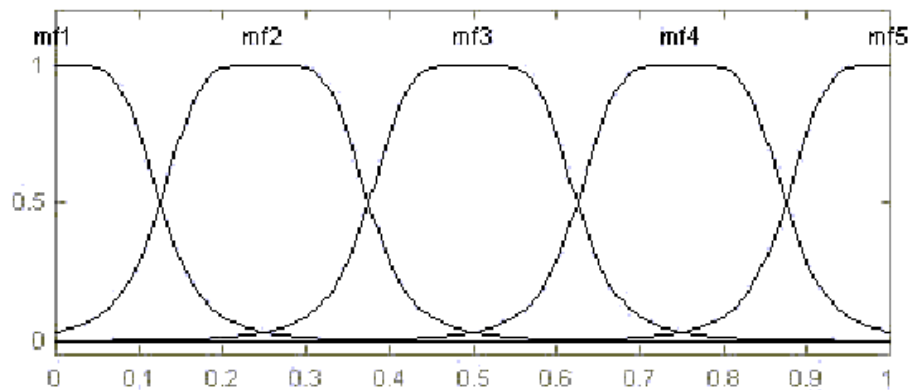


Рисунок 3.2 – Загальний вид дзвіноподібної функції належності

Особливість цих функцій полягає в тому, що вони можуть змінювати не тільки свою форму, але й ширину ділянки з максимальним значенням, як показано на рисунку 3.2.

Підвищення відповідності моделі реальному процесу полягає у створенні бази правил та вибору відповідної кількості функцій належності за результатами експериментальних досліджень.

Зокрема для процесів одержання гуміново-мінеральних твердих композитів складу I, II III для змінних  $M_{ш}$ ,  $K_w$ ,  $T_g$ ,  $Q_p$ ,  $C_p$ ,  $H_{sh}$ ,  $T_{sh}$  [118] запропоновано типи функцій належності, наведені на рисунку 3.3.



- Рисунок 3.3 – Розподіл функцій належності для змінних  $M_{ш}$ ,  $K_w$ ,  $T_g$ ,  $Q_p$ ,  $C_p$ ,  $H_{sh}$ ,  $T_{sh}$ .
- 
- Відповідно для змінних  $D_{еноч}$ ,  $D_{енр}$ ,  $n$  і  $z$  з урахуванням більшого ступеня їх варіативності запропоновано функцію приналежності, наведену на рисунку 3.4.

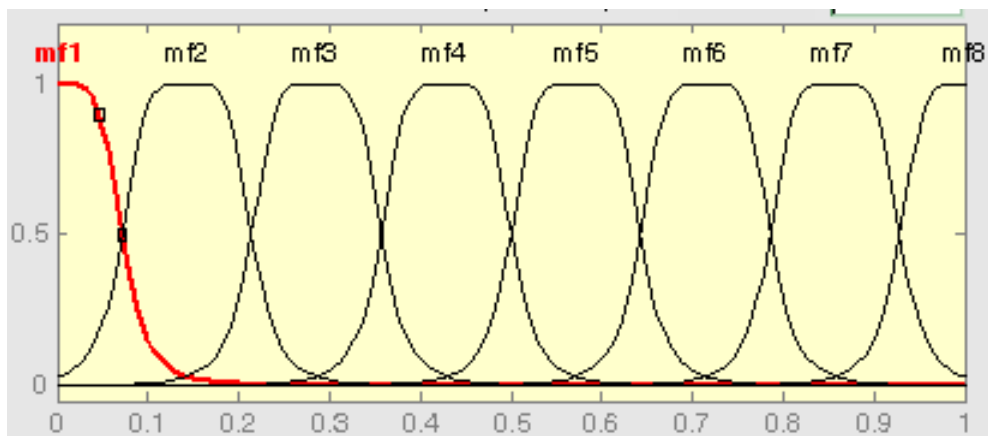


Рисунок 3.4 – Розподіл функцій належності для змінних  $D_{еноч}$ ,  $D_{енр}$ , " $n$ " і " $z$ ".

Окрім того, створено базу правил, які описують якісні зміни вихідних при варіативних змінах вхідних параметрів. Таким чином, узагальнена структурна схема моделі безперервного процесу утворення гуміново-мінеральних твердих композитів наведена на рисунку 3.5.

Модель ґрунтується на трьох модулях: I – вхідні змінні, що враховують технологічні параметри, хімічний склад продукту тощо, II модуль – врахування особливостей кінетики, способу стабілізації дисперсного складу, III – якісні й кількісні характеристики, що характеризують ефективність процесу.

Функція якості "*L*" враховує відхилення масового розподілення гранульованого продукту від заданого, коефіцієнт гранулоутворення "*Psi*" визначається відношенням маси гранульованого продукту до маси сухих речовин, які надійшли з робочим розчином. Область бажаних значень для цих функцій є:  $L \rightarrow 0$ ,  $Psi \rightarrow 0,99$ . [119,120]

Для досягнення поставленої мети блок "*Psi*" має зворотній зв'язок з змінними "*Tsh*", "*Hsh*", "*De<sub>np</sub>*".

Основною умовою стійкої кінетики процесу утворення твердих композитів з пошаровою структурою є забезпечення стабільності загальної поверхні частинок в шарі та їх числа з урахуванням вивантаження гранульованого продукту та відновлення центрів грануляції за рахунок внутрішнього або зовнішнього джерела.

Для цього у блоці II і III безперервно за допомогою вбудованих функцій середовища MatLab обраховуються задане та поточне значення функції потужності нових центрів грануляції  $Fi(D)$ , розраховуються їх розбіжність  $dFi(D)$ . В разі набуття функцією  $dFi(D)$  в діапазоні від 0–2,3 від'ємних значень (недостатня інтенсивність утворення нових центрів грануляції) необхідно вводити додатково в апарат нові центри грануляції із зовні. При значеннях  $dFi(D)=0$  центри грануляції утворюються за рахунок подрібнення частини великих гранул – внутрішній рецикл. Наявність зворотнього зв'язку з попередніми блоками дозволяє за спеціальним алгоритмом визначити зміну відповідних параметрів.

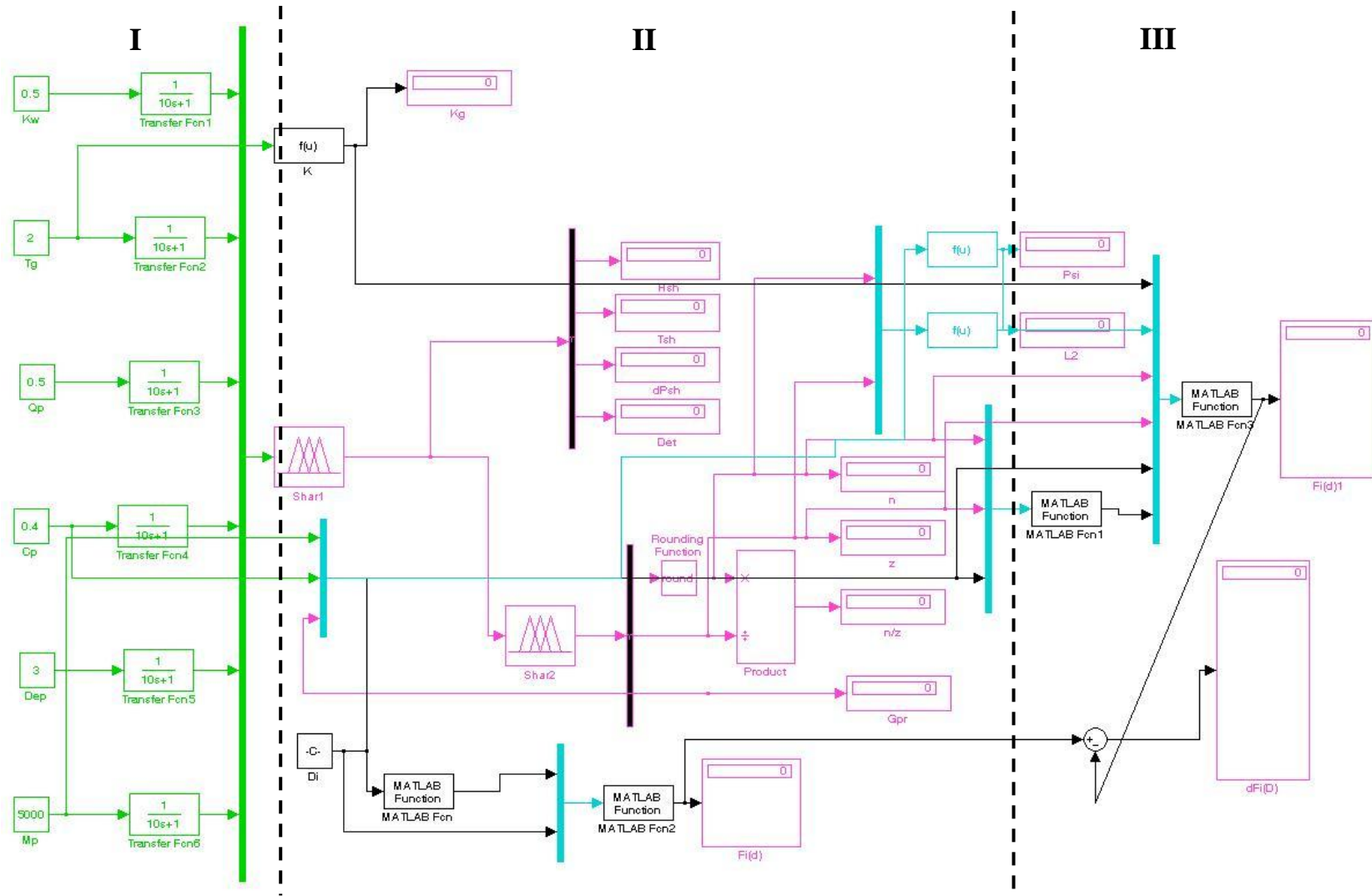


Рисунок 3.5 – Структурна схема робочої моделі системи гранулоутворення гуміново-мінеральних твердих композитів



Таблиця 1 – Результати розрахунку моделі

№	Розрахункові величини							Експериментальні величини						Δ
	D <sub>ен</sub>	n	z	n/z	dFi(d)	Psi	L	D <sub>e</sub>	n	z	n/z	ψ	L	
1.	1,9	17	7,4	2,29	0,2	0,81	2,5	2,43	13	5,61	2,31	0,97	2,3	0,03
2.	2,2	19	8,41	2,3	0	0,97	0	2,35	12	5,1	2,35	0,97	0	0,34
3.	1,7	14	7,8	1,82	2,4	0,84	12,6	1,92	16	8,52	1,87	0,98	13,84	0,09
4.	2	17	7,65	2,2	0,17	0,89	2,28	2,26	12	4,66	2,57	0,97	2,6	0,12
5.	3	17	3,79	4,5	-3,958	0,89	12,6	2,52	14	5,55	2,52	0,98	12,02	0,13
6.	3,5	21	3,73	5,5	-4,305	0,81	12,8	2,71	13	5,12	2,53	0,97	15,22	0,07

Для розрахунків 1, 2 отримані незначні значення функції втрат якості  $0 \leq L \leq 2,5$  при цьому коефіцієнт гранулоутворення складає значення  $\psi \geq 0,98$ , а значення функції нових центрів гранулоутворення  $\Delta\phi \leq 0,2$ , тобто, реалізоване за рахунок внутрішнього рециклу, підтверджує положення фізичної моделі: заданий гранулометричний склад характеризується невеликими значеннями функції втрат якості.

Розрахунки 3,4 при високому коефіцієнті гранулоутворення  $\psi \geq 0,97$  показують значне відхилення гранулометричного складу від заданого –  $12,6 \leq L \leq 24$ , а значення функції  $2,17 \leq \Delta\phi \leq 2,4$  обґрунтовують необхідність реалізації подальшого процесу при недостатній кількості нових центрів гранулоутворення.

Розрахунки 5,6 при задовільному коефіцієнті гранулоутворення також показують відхилення гранулометричного складу від заданого –  $12,6 \leq L \leq 12,8$  при значеннях функції нових центрів гранулоутворення  $-4,305 \leq \Delta\phi \leq -2,93$ , тобто для цих параметрів необхідно введення зовнішнього рециклу визначеного гранулометричного складу й маси.

Порівняння результатів, розрахованих на основі експериментальних даних дослідів з азото-кальцієво-гуміновими добривами, показує збіжність з результатами математичної моделі з середньою похибкою менше 13%, що підтверджує адекватність математичної моделі, базованої на основі нечіткої логіки.

Це дасть змогу в умовах промислової реалізації технології виробництва гранульованих гуміново-мінеральних добрив визначити ступінь дії системи

автоматичного керування процесом в разі виникнення збурень внаслідок стохастичної зміни окремих технологічних параметрів процесу, а при форс мажорних ситуаціях оперативно вивести установку з робочого режиму і визначити порядок дій технічного персоналу, що дасть можливість зменшити енерговитрати та отримати максимальну кількість якісного продукту з відповідними характеристиками, визначеними заздалегідь.

## Перелік посилань

1. Христева Л.А. О природе действия физиологически активных кислот и других стимуляторов роста растений // Гуминовые удобрения и практика их применения: - К.: Тр ДСХИ – 1968 – с. 13-27.
2. Рекомендации по применению и производственной оценке гумата натрия // Под. ред. Христовой Л.А. – Днепропетровск: ДСХИ –1981 – с. 1-4.
3. МИТК Гамма, Новочебоксарск, республика Чувашия. [Электронный ресурс] htm.
4. ТУ 0391-001-40830869-97.
5. 17. Патент РФ №2075466.
6. Мастерски В.Н., Логинов В.А. Исследование некоторых физико-химических свойств гуминовых кислот // Почвоведение, 1959. – № 2 – 39с.
7. Горовая А.И., Орлов Д.С., Щербенко О.В. Гуминовые вещества. Строение, функции, механизм действия, протекторные свойства, экологическая роль. – К.: Наукова думка, 1995. 302 с.
8. . Вакал С.В. Еколого-економічні аспекти застосування органо-мінеральних добрив // Хімічна промисловість України, 2008, № I с. 46-49.
9. М.К. Шикула, А.Д. Балаєв, О.І. Наумовська Агровиробничі заходи збереження екології ґрунтів. / Збереження і моніторинг біологічного та ландшафтного різноманіття в Україні. – К.: Національний екологічний центр України, 2000. – 244с.
10. Рекомендации по применению и производственной оценке гумата натрия // Под. ред. Христовой Л.А. – Днепропетровск: ДСХИ –1981 – с. 1-4.
11. Христева Л.А. О природе действия физиологически активных кислот и других стимуляторов роста растений // Гуминовые удобрения и практика их применения: - К.: Тр ДСХИ – 1968 – с. 13-27

12. Квасов Н.А. Применение гумата натрия и азотных удобрений с целью повышения урожая и качества зерна озимой пшеницы: Пути повышения качества зерна с.-х. культур. – Ставрополь, 1999. – 212 с.
13. Шахова Н.А., Ластовцева Г.Н. Исследование аэродинамики и теплообмена неизотермической структуры в псевдооживленном слое // Теоретические основы хим. технологии – 1975. – №5. – С. 710 – 716.
14. Грануляторы и распылительные сушилки. - [Электронный ресурс]. - <http://www.VectorCorp.com>.
15. Давидсон И. Псевдооживление / Давидсон И., Харрисон Д.; пер. с англ. Айнштейна В. Г., Гельперина Э. Н., Новобратского В.Л. – М.: Химия, 1974. – 728 с.
16. Тодес О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / О. М. Тодес, О. Б. Цитович – Л.: Химия, 1981. – 295 с.
17. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплообмен в химической кинетике. Изд. 2-е М., «Наука», 1977. 492 с. с ил.
18. Тодес О.М. Проблемы кинетики и катализа. Е. VII., М., Изд-во АН СССР, 1949. 452 с. с ил.
19. Тодес О.М., Каганович Ю.Я., Себалло В.А. и др. Обезвоживание растворов в кипящем слое. – М.: Металлургия, 1973. – 287с.
20. Randolph A.D. and Larson M.A., 1991, Theory of particulate processes, 2nd edition, Academic Press. New York.
21. Корнієнко Я.М. Математичне моделювання безрециклового процесу грануляції у псевдозрідженому шарі. // Наукові вісті НТУУ “КПІ” – 2000. - № 2. – С. 38–41.
22. Goldschmidt M.J.V., Kuipers J.A.M., Van Swaaij W.P.M., 2001a, Hydrodynamic modelling of dense gas-fluidised beds using the kinetic theory of granular flow: effect of the coefficient of restitution on bed dynamics, Chem. Eng.Sci., 56, 571–578.

23. Taguchi G. *Taguchi on Robust Technology Development: Bringing Quality Engineering Upstream*, ASME Press, New York. – 1993. – 293 p.
24. Unal. R., Dean E.B. *Taguchi Approach to Design Optimization for Quality and Cost //An Overview*, *Proc. of the 13th Annual Conf. of the International Society of Parametric Analysts*. – New Orleans, LA, (USA). – 1991. P. 296 – 303.