

**Купчук І.М.**

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Kurchuk I.**Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 631.363.4:539.3****DOI: 10.37128/2306-8744-2026-1-2**

ДЕСКРИПТОРНИЙ ПІДХІД ДО ОПИСУ ПРОЦЕСІВ ЗМІШУВАННЯ КОРМОВИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті запропоновано системний дескрипторний підхід до опису процесів змішування багатокомпонентних кормових матеріалів, у межах якого процес інтерпретується як еволюція стану в багатовимірному просторі фізично інтерпретованих координат. Актуальність дослідження зумовлена складною реологічною природою кормових сумішей, що поєднують фрикційні, когезійні, волокнисті та в'язкопластичні компоненти, для яких характерна просторово-часова неоднорідність напружено-деформованих станів. Традиційний механістичний опис через окремі механізми перемішування не забезпечує узгодженої координатної мови аналізу режимів і переходів між ними.

Метою роботи є формування узагальненого простору станів процесу змішування та структуризація взаємозв'язків між дескрипторами як координатами цього простору. Методологічною основою дослідження є концептуальне моделювання, структурно-логічний аналіз та фізична інтерпретація обмежень, що впливають із закономірностей механіки гранулярних і в'язкопластичних середовищ. Стан процесу подано у вигляді вектора дескрипторів D_1 – D_9 , згрупованих у чотири функціональні блоки: матеріально-мікроструктурний, деформаційно-енергетичний, потоково-топологічний та еволюційно-стабілізаційний.

Показано, що режими змішування доцільно трактувати як підобласті допустимого простору станів, сформованого з урахуванням фізичних, реологічних і структурно-топологічних обмежень. Встановлено три типи структурних взаємозв'язків між дескрипторами: фізичну несумісність, умовне домінування та ієрархічну підпорядкованість. Сукупна дія цих співвідношень формує внутрішню геометрію простору станів, зумовлює стратифікацію режимних областей та визначає допустимість комбінацій координат. Обґрунтовано, що «звуження» простору можливих станів є наслідком фізичних властивостей матеріального середовища, а не формального припущення моделі.

Запропонований підхід забезпечує перехід від емпірично орієнтованого опису процесу змішування до його системної інтерпретації як структурованої множини фізично допустимих станів, що створює методологічне підґрунтя для подальшої кількісної параметризації еволюції процесу, розроблення критеріїв режимної стабільності та оптимізації режимів роботи змішувальних апаратів різних конструктивних типів.

Ключові слова: режимність змішування, багатовимірний простір станів, структурно-топологічна організація потоку, допустимі області процесу, ієрархія дескрипторів, стратифікація режимів, системна формалізація змішування.



Вступ. Процеси змішування багатокомпонентних кормових матеріалів належать до складних фізико-механічних явищ, перебіг яких визначається поєднанням різнотипних механізмів перенесення, деформації та структурної перебудови матеріального середовища. У технологіях приготування кормових сумішей одночасно взаємодіють сипкі гранулярні, когезивні, волокнисті та в'язкопластичні компоненти, що зумовлює формування просторово неоднорідних потоків, локалізованих зон зсувної деформації та демісійних проявів. За таких умов досягнення стабільної просторової однорідності суміші не може бути пояснене виключно кінематикою змішувального апарата або інтенсивністю циркуляційних потоків, а потребує фізично обґрунтованого аналізу поведінки матеріального середовища як цілісної системи [1, 2].

У більшості сучасних досліджень процес змішування описується через перелік домінуючих механізмів – конвективного перенесення макрооб'ємів матеріалу, зсувно-індукованих мікропереміщень частинок та умовно дифузійної складової перемішування. Такий механістичний підхід широко використовується для аналізу апаратів різних типів і дозволяє ідентифікувати окремі фізичні явища [1, 4]. Водночас він не формує узгодженої мови опису процесу як фізичного об'єкта, стан якого визначається сукупністю взаємопов'язаних характеристик і істотно залежить від властивостей матеріалу та умов деформації.

Фундаментальні дослідження з механіки гранулярних і дисперсних середовищ показують, що навіть за відносно простої геометрії апарата поєднання конвективних потоків, локалізованих зон зсуву та сегрегаційних механізмів формує складні просторові структури руху матеріалу, які не можуть бути адекватно охарактеризовані лише інтегральними показниками однорідності [2, 3]. Для когезивних і в'язкопластичних середовищ ситуація додатково ускладнюється пороговим характером реологічної реакції матеріалу та локалізацією деформацій у зонах, де напруження перевищує границю текучості [5].

У попередніх дослідженнях було сформульовано фізичні принципи перебігу процесів змішування кормових матеріалів та запропоновано фізично орієнтовану класифікацію процесів, інваріантну до конструктивного типу змішувального апарата [6]. Показано, що ефективність формування однорідної суміші визначається співвідношенням між зонами активної деформації матеріалу та областями, які залишаються слабо залученими до процесу, а

також характером демісійних проявів. Разом із тим зазначений підхід не був спрямований на формалізацію узагальненої мови опису процесу та не розглядав систему дескрипторів як самостійний об'єкт методологічного аналізу.

У зв'язку з цим актуальним є представлення процесу змішування кормових матеріалів як фізичного процесу, стан якого може бути описаний у багатовимірному просторі фізичних і структурно-топологічних дескрипторів. У такому підході кожен дескриптор інтерпретується як координата, що відображає окремий аспект поведінки матеріального середовища, тоді як режими змішування відповідають допустимим областям цього простору, обмеженим фізичними та матеріальними умовами.

Метою дослідження є формування системного дескрипторного підходу до опису процесу змішування кормових матеріалів шляхом побудови простору станів та структуризації взаємозв'язків між параметрами процесу.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких завдань:

- сформувати просторову інтерпретацію системи дескрипторів як координат багатовимірному простору станів;
- інтерпретувати режими перебігу процесу змішування як області у просторі станів;
- встановити структурні взаємозв'язки між дескрипторами (фізичну несумісність, умовне домінування, ієрархічну підпорядкованість) та дослідити їх вплив на допустимість комбінацій дескрипторів.

Методи досліджень. Дослідження має теоретико-методологічний характер і ґрунтується на фізичному аналізі процесів змішування багатокомпонентних кормових матеріалів. Методологічною основою є уявлення про процес змішування як фізичний процес, перебіг якого визначається поєднанням механізмів перенесення, деформації та структурної перебудови матеріального середовища. Такий підхід відповідає сучасним уявленням теорії змішування та механіки гранулярних середовищ, у яких опис процесів здійснюється через введення узагальнених фізично осмислених змінних, інваріантних до конкретної апаратної реалізації [1–3].

Формування узагальненого опису процесу змішування виконано із застосуванням концептуального моделювання, що широко використовується у теорії змішування та фізиці складних систем для побудови абстрактних описів процесів на основі фізично інтерпретованих змінних [1, 4, 7]. У межах цього підходу фізичні та структурно-топологічні дескриптори інтерпретуються як координати простору станів процесу, кожна з яких



відображає окремий аспект поведінки матеріального середовища – характер деформації, структуру потоків, локалізацію зон активного зсуву та умови прояву сегрегаційних ефектів [2].

Аналіз взаємозв'язків між дескрипторами здійснюється із застосуванням структурно-логічного аналізу, який використовується для дослідження багатопараметричних фізичних процесів з обмеженим набором фізично допустимих станів і взаємозалежних характеристик [4, 9]. У межах цього аналізу взаємодія між дескрипторами розглядається через ієрархічну підпорядкованість, умовне домінування та фізичну несумісність окремих характеристик, що зумовлено матеріальними властивостями кормових сумішей і характером напружено-деформованого стану під час змішування.

Фізичні обмеження допустимих комбінацій значень дескрипторів аналізуються з позицій механіки та реології дисперсних і когезивних середовищ із використанням методу фізичної інтерпретації обмежень, що ґрунтується на відомих закономірностях порогової текучості, локалізації деформацій та структурної нестійкості матеріальних середовищ [2, 5, 8]. У цьому контексті «звуження» простору можливих станів процесу трактується як наслідок фізичних властивостей матеріалу, а не як формальне або емпіричне обмеження.

Інтерпретація режимів перебігу процесу змішування здійснюється в межах просторового підходу до аналізу режимів, відповідно до якого режими розглядаються як області багатовимірному простору станів, сформовані поєднанням фізичних і матеріальних чинників [1, 2]. Такий підхід дозволяє перейти від опису процесу через окремі механізми до узагальненого аналізу структури можливих станів процесу.

Застосований комплекс методів формує методологічно узгоджену основу для аналізу фізичних і структурно-топологічних дескрипторів процесу змішування та створює передумови для подальшого розвитку кількісних моделей і прикладних методів оптимізації без прив'язки до конкретних конструктивних рішень [1, 6].

Результати досліджень. Процес змішування багатокомпонентних кормових матеріалів є фізично складним явищем, у якому результат (досяжна однорідність і її збереження) визначається сполученням деформаційного перенесення, структурної організації потоку та конкурентних демісійних ефектів, зокрема сегрегації [1-3, 7]. Опис процесу лише через перелік механізмів (конвекція, зсув, «дифузійний» вклад) є корисним як якісна інтерпретація, однак не формує узгодженої координатної мови, необхідної для аналізу

режимів і переходів між ними [1, 7]. У межах дескрипторного підходу стан процесу доцільно задавати – через вектор дескрипторів (вектор стану):

$$d(t) = (D_1(t), D_2(t), \dots, D_9(t))^T \in \Omega_d, \quad (1)$$

де Ω_d – простір станів процесу; D_i – фізично інтерпретовані координати, введені та змістовно обґрунтовані в [6].

Така постановка узгоджується з системним підходом, в якому процес розглядається як об'єкт із сукупністю взаємопов'язаних змінних стану [8, 9]. Еволюцію стану в загальному вигляді подано як керовану динамічну систему:

$$d'(t) = F(d(t), u(t), \theta) \quad (2)$$

де $u(t)$ – керувальні впливи (кінематичний режим, інтенсивність збурення або циркуляції тощо), а θ – параметри матеріалу (вологість, волокнистість, когезія, гранулометричні ознаки тощо), що визначають механізми перебудови структури потоку та реалізації деформації [1–3, 5, 7]. Дескрипторне подання у вигляді $d(t)$ забезпечує єдину формальну основу для опису режимності процесу як геометрії допустимих областей у просторі Ω_d , тоді як параметризація функції F та побудова конкретних кількісних моделей розглядаються як наступні етапи розвитку підходу [1, 7–9].

Такий запис має узагальнений характер і не передбачає побудови конкретної математичної моделі, відображає принципову залежність еволюції процесу змішування від поточного стану матеріального середовища, режимів механічного впливу та фізико-механічних властивостей кормових матеріалів і створює формальну основу для аналізу допустимих траєкторій у просторі станів.

У попередній роботі [6] дескриптори згруповано як фізичні та структурно-топологічні, що є достатнім для фізично орієнтованої класифікації процесів (інваріантної до конструктивного типу змішувача). Однак інтерпретація дескрипторів як координат Ω_d вимагає уточнення: для простору станів принциповою є функція координати у формованні режиму. Частина координат описує матеріальну основу процесу (взаємодії, пороговість, реологічний тип), частина – характер деформації та енергетичний режим (розподілена/локалізована деформація, масштаб активних переміщень, дисипація), частина – архітектуру потоку (структура потоків, зонність, залучення об'єму), а частина – часову стабільність сформованої структури [1, 7-9].

Відповідно застосовано чотиригрупову декомпозицію системи дескрипторів (табл. 1), яка є розвитком підходу [6] і забезпечує режимну інтерпретацію процесу в термінах областей простору станів. У межах запропонованого підходу система дескрипторів процесу



змішування включає такі фізично інтерпретовані характеристики: D_1 – тип міжчастинкових взаємодій; D_2 – реологічна реакція середовища; D_3 – характер деформаційного відгуку матеріалу; D_4 – масштаб активних переміщень; D_5 – характер енергетичної дисипації; D_6 – структура потоків; D_7 – просторова організація зон течії; D_8 – ступінь залучення об'єму матеріалу до процесу; D_9 – стійкість сформованої просторової структури. Фізична суть і функціональна роль зазначених дескрипторів у процесі змішування більш детально обґрунтовані в попередній роботі [6].

Таблиця 1
Функціональна структура системи дескрипторів D_1 – D_9 у просторі станів процесу Ω_d

№	Функціональна група	Позначення	Дескриптори
1	Матеріально-мікроструктурна	$\Omega^{(m)}$	D_1, D_2
2	Деформаційно-енергетична	$\Omega^{(e)}$	D_3, D_5
3	Потоково-топологічна	$\Omega^{(t)}$	D_4, D_6, D_7, D_8
4	Еволюційно-стабілізаційна	$\Omega^{(s)}$	D_9

Функціональне групування дескрипторів узгоджує фізичну інтерпретацію процесу з режимністю в просторі станів. Група $\Omega^{(m)}$ задає межі реалізованості деформаційної реакції за рахунок типу міжчастинкових взаємодій та реологічного типу середовища, які відіграють визначальну роль для порогових, когезивних і в'язкопластичних компонентів [5]. Група $\Omega^{(e)}$ описує спосіб реалізації перемішування через деформаційні та транспортні механізми, включно з масштабом активних переміщень і режимом енергетичної дисипації, що узгоджується з кінематичними уявленнями про процеси змішування як поєднання деформації, конвективного перенесення та перебудови внутрішньої структури матеріалу [1, 7]. Група $\Omega^{(t)}$ визначає просторову організацію потоку та ступінь залучення об'єму матеріалу, що є критичним для розрізнення глобального змішування від локального перемішування з пасивними зонами, а також для аналізу взаємодії процесів змішування й сегрегації в гранулярних системах [1-3]. Група $\Omega^{(s)}$ вводить координату часової стійкості просторової структури, без урахування якої ускладнюється формальне розрізнення стаціонарних режимів і

режимів із перебудовою потоків та зміною структур течії [7-9].

Не всі комбінації значень координат d є фізично реалізованими, оскільки для багатокомпонентних сумішей існують порогові, структурно-обумовлені та сегрегаційно-індуковані обмеження, які формують множину допустимих станів:

$$\Omega_{adm} = \{d \in \Omega_d: g_k(d, \theta) \leq 0, k = 1, \dots, m\}. \quad (3)$$

Функції g_k відображають фізично інтерпретовані обмеження, що виникають унаслідок порогового характеру текучості та локалізації деформацій у когезивних і в'язкопластичних середовищах (взаємодія груп $\Omega^{(m)}$ – $\Omega^{(e)}$) [5], взаємодії процесів змішування та сегрегації в гранулярних (взаємодія $\Omega^{(e)}$ – $\Omega^{(t)}$) [2, 3], а також структури потоків і ступеня залучення об'єму матеріалу, що визначає ефективний активний об'єм процесу (внутрішні співвідношення в $\Omega^{(t)}$) [1, 7]. У такій постановці «звуження» простору станів є наслідком фізичних властивостей матеріалу та структури процесу, а не формальним припущенням.

Режими процесу доцільно визначати як підмножини допустимої області:

$$R_j \subset \Omega_{adm}, \Omega_{adm} = \bigcup_{j=1}^J R_j, R_i \cap R_j \approx \emptyset (i \neq j), \quad (4)$$

де R_j – підмножина допустимого простору станів, що відповідає режиму (наприклад, стійке глобальне змішування; локалізоване змішування з пасивними зонами; нестационарний режим із перебудовою структури потоку). Така інтерпретація забезпечує перехід від опису процесу через окремі механізми до аналізу структури можливих станів і меж між режимами в просторі Ω_d [1, 7-9].

Формально режим R_j можна визначити як підмножину допустимої області, для якої виконується система умов на дескриптори:

$$R_j = \{x \in \Omega_{adm}: \Phi_j(x) \leq 0\}, \quad (5)$$

де $\Phi_j(x)$ – узагальнена функціональна умова належності стану до відповідного режиму. У загальному випадку $\Phi_j(x)$ задається сукупністю обмежень на окремі дескриптори або їх комбінації, що відображають характер розподілу деформацій, структуру потоків та ступінь залучення матеріалу до активної зони змішування. Таким чином, режим процесу інтерпретується як область простору станів, межі якої визначаються структурними та фізичними умовами перебігу процесу.

Для формалізації режимної стабільності в просторі станів доцільно використовувати узагальнений критерій, побудований на основі підходу Ляпунова. Нехай $d^* \in R_j$ – репрезентативний стан відповідної режимної області, тоді у межах цієї області може бути



визначена функція $V(d)$, яка слугує мірою відхилення поточного стану від характерної структури режиму:

$$V(d) \geq 0, V(d^*) = 0, \dot{V} = \nabla V \cdot F(d, u, \theta) \leq 0. \quad (6)$$

У такій інтерпретації дескриптор D_9 характеризує часову стійкість просторової структури: у стійкому режимі траєкторія $d(t)$ залишається в межах R_j (або в її малій області), тоді як у нестійкому – відбувається вихід за межі області та перехід у іншу режимну область (режимне перемикання). Системне формулювання режимності як властивості областей у Ω_d узгоджується з підходами синергетики та загальної теорії систем, у яких еволюція складних процесів описується через структуру множин станів і їх стійкість [8, 9], а також із кінематичним трактуванням змішування як процесу перенесення та перебудови [7].

На рис. 1 подано приклад радіальної проєкції дев'ятивимірного простору дескрипторів $d = (D_1, \dots, D_9)$ у дискретизованому вигляді. Кожна вісь відповідає окремому дескриптору, а концентричні кола відображають можливі рівні L_1-L_4 . Зовнішній пунктирний контур задає межу повного простору Ω_d , тоді як допустима область Ω_{adm} формується шляхом виключення підмножин, що не задовольняють фізичним обмеженням $g_k(d, \theta) \leq 0$. Заштриховані ділянки мають ілюстративний характер і демонструють приклади локальних обмежень сумісності дескрипторів. Режимні області R_1 (блакитний колір) та R_2 (рожевий колір) трактуються як підмножини Ω_{adm} , у межах яких домінує певний тип структурної організації процесу.

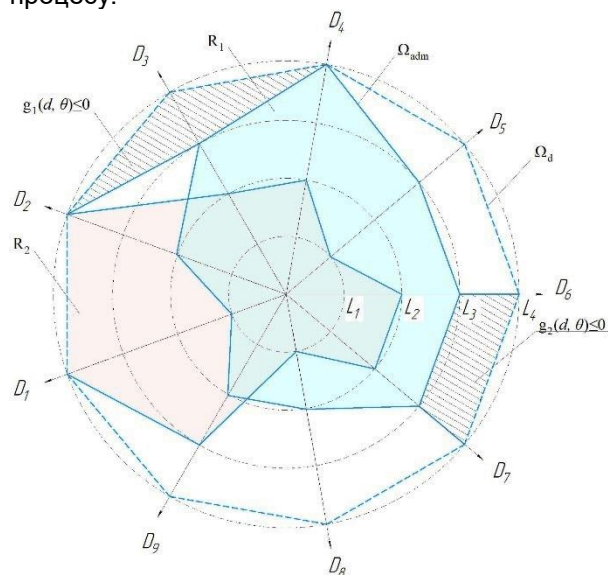


Рис. 1. Схематична радіальна проєкція дескрипторного простору станів Ω_d у координатах D_1-D_9 з дискретними рівнями L_1-L_4 .

Візуальне накладання або часткове перекриття контурів R_1 і R_2 у радіальній схемі не означає їх фактичного перетину в повному просторі Ω_d . По-перше, рисунок є проєкцією багатовимірного простору на площину, що не зберігає метричних і топологічних властивостей множин. По-друге, режимні області визначаються як області домінування механізмів у багатовимірному просторі дескрипторів; їх «перекриття» на проєкції може відповідати різним координатним комбінаціям у повному просторі. Таким чином, умова (4) інтерпретується як відсутність стійких станів, що одночасно належать двом режимам, тоді як видиме перекриття на схемі є наслідком графічного відображення та не суперечить формальній постановці.

Запропонована координатна інтерпретація системи дескрипторів D_1-D_9 , сформульованої у [6], забезпечує перехід від механістичного опису змішування до аналізу процесу як структурованого простору станів Ω_d з допустимою областю Ω_{adm} і режимними підобластями R_j . Об'єднання дескрипторів у чотири функціональні групи формує основу для подальшого формалізованого аналізу взаємозв'язків між координатами у вигляді правил сумісності, домінування та ієрархії, що визначають геометрію Ω_{adm} і межі між режимами [1-3, 5-9].

Уведення режимних підобластей $R_j \subset \Omega_{adm}$ як геометричної інтерпретації перебігу процесу змішування потребує уточнення внутрішньої структури допустимого простору станів [7-9]. Обмеження виду $g_k(d, \theta) \leq 0$ визначають лише фізично реалізовані комбінації координат, однак вони не вичерпують характер взаємозалежності дескрипторів [1, 2, 8]. Реальна конфігурація режимних областей формується також через структурні співвідношення між координатами D_1, \dots, D_9 , що мають природу фізичної несумісності, умовного домінування та ієрархічної підпорядкованості [8-10].

Спираючись на раніше визначену фізичну класифікацію дескрипторів [6] та позначення рівнів, використані на рис. 1, структурні координати простору станів доцільно розглядати як такі, що набувають характерних рівнів [10, 11]. Зокрема, для дескриптора D_1 , що характеризує тип міжчастинкових взаємодій, маємо

$$D_1 \in L := \{L_1^{(1)}, L_2^{(1)}, L_3^{(1)}, L_4^{(1)}\}, \quad (7)$$

де $L_1^{(1)}-L_4^{(1)}$ відповідають, відповідно, контактно-фрикційним, когезійно-адгезійним, геометрично-орієнтаційним та структурно-зв'язаним (із наявністю границі текучості) типам взаємодії частинок [10, 12, 13]; верхній індекс означає



номер дескриптора. Інші дескриптори можуть інтерпретуватися аналогічно – як дискретні рівні або як неперервні інтервали залежно від їх фізичної природи.

Фізична несумісність виникає тоді, коли певні поєднання рівнів різних дескрипторів не можуть реалізовуватися одночасно через механічні або реологічні обмеження середовища [13]. Узагальнено множина несумісних станів може бути подана у вигляді

$$X = \bigcup_{i < j} X_{ij}, X_{ij} \subseteq L_i \times L_j, \quad (8)$$

де L_i – множина допустимих рівнів дескриптора D_i . У цьому випадку допустимий простір станів задовольняє умову:

$$\Omega_{adm} \subseteq \Omega_d \setminus X, \quad (9)$$

тобто комбінації, що належать множині X , не можуть реалізовуватися в межах фізично допустимих режимів.

Характерним прикладом є поєднання стану локалізованої зсувної деформації $D_3 = L_2^{(3)}$ із максимальним залученням об'єму матеріалу ($D_8 \rightarrow D_8^{\max}$). Для структурно-зв'язаних середовищ (зокрема, за умови $D_1 = L_4^{(1)}$) реалізація порогової текучості супроводжується формуванням пасивних зон, що обмежують участь усього об'єму матеріалу в активному перемішуванні. Формально це відображається співвідношенням

$$D_3 \rightarrow D_3^{\max} \Rightarrow D_8 < D_8^{\max}. \quad (10)$$

Отже, для структурно-зв'язаних середовищ ($D_1 = L_4^{(1)}$) одночасна реалізація стану локалізованої деформації ($D_3 \rightarrow D_3^{\max}$) та повного залучення об'єму матеріалу ($D_8 \rightarrow D_8^{\max}$) є фізично несумісною, що формує внутрішню виключену область у просторі станів.

Інший характерний випадок стосується стану $D_1 = L_1^{(1)}$. За відсутності когезійних зв'язків можливість довготривалої стабілізації просторової конфігурації є обмеженою, що формально може бути подано як

$$D_1 = L_1^{(1)} \Rightarrow D_9 \leq D_9^*, \quad (11)$$

де D_9^* – граничне значення дескриптора часової стійкості, характерне для контактно-фрикційної взаємодії.

Аналогічно, інтенсивна перебудова потокової структури ($D_6 \rightarrow D_6^{\max}$) є несумісною з високою часовою стабільністю режиму [14], що формально може бути подано як:

$$D_6 \rightarrow D_6^{\max} \Rightarrow D_9 \rightarrow D_9^{\min}. \quad (12)$$

Такі співвідношення формують внутрішні виключені області простору станів і визначають реальні межі режимних зон.

Умовне домінування відображає ситуацію, коли вибір конкретного рівня одного дескриптора звужує допустимі значення іншого [5, 15]. На відміну від фізичної несумісності, умовне домінування не виключає комбінації повністю, а лише звужує їх допустимий інтервал.

Формально це можна подати як залежність:

$$D_i = d_i \Rightarrow D_j \in I_j(d_i), \quad (13)$$

де $I_j(d_i) \subseteq L_j$ – підмножина або інтервал допустимих значень дескриптора D_j , параметризований значенням D_i . Матеріально-мікроструктурні дескриптори (D_1, D_2) обумовлюють допустимі області деформаційного режиму (D_3) та механізму дисипації енергії (D_5).

Зокрема,

$$D_1 \in \{L_2^{(1)}, L_3^{(1)}\} \Rightarrow D_3 \in \{L_2^{(3)}, L_3^{(3)}\}, \quad (14)$$

тобто для когезійно-адгезійного та геометрично-орієнтаційного типів міжчастинкових взаємодій переважають локалізовані або переривчасті форми реалізації деформації [16]. Натомість

$$D_1 = L_1^{(1)} \Rightarrow D_3 \in \{L_1^{(3)}\}, \quad (15)$$

що відповідає рівномірно-розподіленій формі зсувної деформації.

Аналогічно, ступінь залучення об'єму матеріалу (D_8) та структура потоків (D_6, D_7) обумовлюють допустимі рівні дескриптора часової стабільності режиму (D_9). Формально це подається як

$$D_9 \in S(D_6, D_7, D_8), S(D_6, D_7, D_8) \subseteq L_9, \quad (16)$$

де $L_9 = \{L_1^{(9)}, L_2^{(9)}, \dots\}$ – множина рівнів дескриптора D_9 , а $S(D_6, D_7, D_8)$ – її підмножина, що параметризується потоково-топологічними характеристиками процесу та ступенем залучення матеріального об'єму. Геометрично це означає, що повний декартів добуток рівнів замінюється умовно звуженою множиною допустимих комбінацій.

На відміну від фізичної несумісності та умовного домінування, які описують локальні обмеження між окремими дескрипторами, ієрархічна підпорядкованість відображає структурну послідовність рівнів опису процесу змішування та полягає в тому, що формування режиму відбувається поетапно – від матеріально-мікроструктурних характеристик середовища до його часової стабільності. Причому кожен наступний рівень має фізичний сенс лише в межах підпростору, сформованого попереднім. У межах дескрипторного простору Ω_d це виражається вкладеною структурою:

$$\Omega_d \supset \Omega^{(m)} \supset \Omega^{(e)} \supset \Omega^{(t)} \supset \Omega^{(s)}, \quad (17)$$

де $\Omega^{(m)}$ відповідає матеріально-мікроструктурному рівню (D_1, D_2), $\Omega^{(e)} \subseteq \Omega^{(m)}$ – деформаційно-енергетичному (D_3, D_5), $\Omega^{(t)} \subseteq \Omega^{(e)}$ – потоково-топологічному (D_4, D_6, D_7, D_8), а $\Omega^{(s)} \subseteq \Omega^{(t)}$ – еволюційно-стабілізаційному рівню (D_9).

Структурна модель ієрархії не передбачає жорсткого визначення всіх дескрипторів після фіксації одного з них, а описує послідовне звуження множин допустимих рівнів. окрема, якщо на



матеріально-реологічному рівні фіксується $D_1 = L_4^{(1)}$, що відповідає структурно-зв'язаному типу міжчастинкових взаємодій із наявністю границі текучості, то це не визначає однозначно D_2 , але звужує множину його допустимих рівнів до таких, що сумісні з в'язкопластичною поведінкою середовища. У межах сформованої множини $\Omega^{(m)}$ визначаються можливі форми деформаційного відгуку та механізми дисипації: для структурно-зв'язаного середовища фізично реалізовними є локалізовані або переривчасті форми зсуву (відповідні рівні D_3) та пластичні механізми втрат енергії (рівні D_5), що формує підмножину $\Omega^{(e)}$.

Далі обраний характер деформації визначає кінематичну організацію процесу. Локалізація зсуву зумовлює певний масштаб активних переміщень D_4 , який разом зі структурою потоків D_6 , просторовою організацією зон течії D_7 та ступенем залучення об'єму D_8 формує допустиму область $\Omega^{(t)}$. Наприклад, локалізований зсув зазвичай супроводжується обмеженим масштабом активних переміщень та неповним залученням робочого об'єму [17, 18], що виключає реалізацію режимів із глобальною циркуляцією матеріалу. Лише після узгодження потоково-топологічної структури має фізичний сенс оцінювати часову стійкість режиму, яка описується дескриптором D_9 ; відповідні допустимі рівні формують підмножину $\Omega^{(s)}$.

Для ілюстрації можна розглянути конкретну траєкторію в цьому стратифікованому просторі (рис. 2). Нехай обрано структурно-зв'язаний тип взаємодій $D_1 = L_4^{(1)}$ та реологічну реакцію $D_2 = L_3^{(2)}$. У такому середовищі реалізується локалізована форма деформаційного відгуку $D_3 = L_2^{(3)}$ із локалізованою дисипацією $D_5 = L_1^{(5)}$, що відповідає стану в $\Omega^{(e)}$. Локалізація визначає характерний масштаб активних переміщень $D_4 = L_2^{(4)}$, зональну структуру потоків $D_6 = L_2^{(6)}$, частково замкнену організацію зон течії $D_7 = L_2^{(7)}$ та локалізоване залучення об'єму $D_8 = L_3^{(8)}$, що формує конкретний стан у $\Omega^{(t)}$. За таких умов можлива лише квазістаціонарна стабільність $D_9 = L_2^{(9)}$, і відповідна комбінація належить $\Omega^{(s)}$.

Встановлені типи структурних взаємозв'язків між дескрипторами (фізична несумісність, умовне домінування та ієрархічна підпорядкованість) формують не лише систему логічних обмежень, а визначають внутрішню геометрію простору станів процесу змішування. Фізична несумісність зумовлює існування виключених підмножин, умовне домінування приводить до звуження допустимих інтервалів окремих координат, тоді як ієрархічна

підпорядкованість формує вкладену структуру підпросторів. Сукупна дія зазначених співвідношень спричиняє стратифікацію багатовимірного простору станів та окреслює фізично обґрунтовані межі режимних областей. Отже, допустимість комбінацій дескрипторів визначається структурною організацією простору станів, а не довільним вибором параметрів процесу.

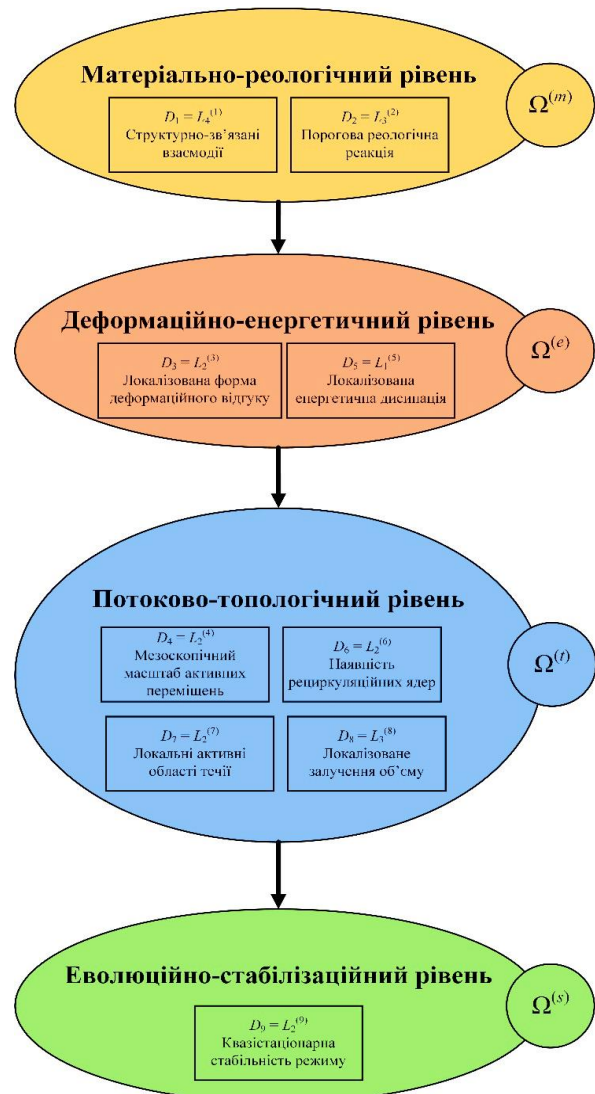


Рис. 2. Приклад реалізації режиму в ієрархічно-стратифікованому просторі дескрипторів D_1 – D_9

Таким чином, дескрипторний підхід забезпечує перехід від емпірично орієнтованого опису змішування до системної інтерпретації процесу як структурованої множини фізично допустимих станів. Це дозволяє розглядати режимність не як зовнішню характеристику апарата, а як внутрішню властивість організації матеріального середовища в умовах механічного впливу.



Висновки та перспективи подальших досліджень.

1. Сформовано системний дескрипторний підхід до опису процесу змішування кормових матеріалів, у межах якого стан процесу інтерпретується як точка багатовимірного простору фізично інтерпретованих координат. Запропонований підхід забезпечує узгоджену мову опису механізмів деформації, перенесення та структурної перебудови матеріального середовища.

2. Показано, що режими перебігу процесу змішування доцільно трактувати як підобласті допустимого простору станів, сформованого з урахуванням фізичних, реологічних і структурно-топологічних обмежень. Це дозволяє перейти від механістичного опису окремих явищ до аналізу структури можливих станів процесу та меж між режимами.

3. Встановлено три типи структурних взаємозв'язків між дескрипторами: фізичну несумісність, умовне домінування та ієрархічну підпорядкованість, які формують внутрішню геометрію простору станів і визначають допустимість комбінацій координат. Показано, що «звуження» простору можливих станів є наслідком фізичних властивостей матеріального середовища та закономірностей його деформування, а не формального обмеження моделі.

4. Запропонована ієрархічно-стратифікована структура простору дескрипторів створює методологічну основу для подальшої формалізації задач оптимізації режимів змішування, аналізу режимних переходів та побудови керованих траєкторій еволюції процесу.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з кількісною параметризацією функції еволюції стану процесу, розробленням критеріїв режимної стабільності та експериментальною верифікацією меж режимних областей для реальних змішувальних апаратів різних конструктивних типів.

Список використаних джерел

1. Paul E. L., Atiemo-Obeng V. A., Kresta S. M. Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice. Hoboken : John Wiley & Sons, 2004. 1376 p. <https://doi.org/10.1002/0471451452>
2. Ottino J. M., Khakhar D. V. Mixing and segregation of granular materials. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2000. Vol. 32. P. 55–91. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.55>
3. Khakhar D. V., McCarthy J. J., Ottino J. M. Mixing and segregation of granular materials in chute flows. *Chaos*. 1999. Vol. 9, No. 3. P. 594–610. <https://doi.org/10.1063/1.166433>.
4. Marigo M., Stitt E. Discrete Element

Method (DEM) for industrial applications. *KONA Powder and Particle Journal*. 2015. Vol. 32. P. 236–252. <https://doi.org/10.14356/kona.2015016>

5. Bonn D., Denn M. M., Berthier L., Divoux T., Manneville S. Yield stress materials in soft condensed matter. *Reviews of Modern Physics*. 2017. Vol. 89, No. 3. 035005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035005>

6. Kupchuk I. Physical principles and classification of feed material mixing processes. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 4 (131). С. 55–68. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-6>

7. Ottino J. M. *The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport*. Cambridge : Cambridge University Press, 1989. 364 p.

8. Haken H. *Synergetics: Introduction and Advanced Topics*. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2004. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10184-1>

9. Bertalanffy L. von. *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York : George Braziller, 1973. 295 p.

10. Jaeger H. M., Nagel S. R., Behringer R. P. Granular solids, liquids, and gases. *Reviews of Modern Physics*. 1996. Vol. 68. P. 1259–1273. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.68.1259>.

11. Forterre Y., Pouliquen O. Flows of dense granular media. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2008. Vol. 40. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102142>.

12. Schulze D. *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow*. Cham: Springer, 2021. 625 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-76720-4>

13. Divoux T., Fardin M. A., Manneville S., Lerouge S. Shear banding in complex fluids. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 48. P. 81–103. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122414-034416>

14. Gray J. M. N. T., Thornton A. R. A theory for particle size segregation in shallow granular free-surface flows. *Proceedings A*. 2005. Vol. 461. P. 1447–1473. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2004.1420>.

15. Chhabra R. P., Richardson J. F. *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology*. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8532-0.X0001-7>.

16. Полевода Ю.А., Волинець Є.О., Бистрицький О.П. Математична модель руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 4 (107). С. 20-25. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-4-3>.

17. Стадник М., Солоня О., Бурлака С. Дослідження впливу геометрії робочих органів змішувача на кінетику змішування сипких середовищ. *Вісник ХНУ. Серія: технічні науки*.



2025. № 2 (349). С. 23-27. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-2>.

18. Стадник М., Бабин І., Луц П., Ріпа С. Аналіз теоретичних досліджень пристроїв дозування та змішування живильних розчинів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 90-96. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-3-11>

References

1. Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (2004). *Handbook of industrial mixing: Science and practice*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471451452>

2. Ottino, J. M., & Khakhar, D. V. (2000). Mixing and segregation of granular materials. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32, 55–91. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.55>

3. Khakhar, D. V., McCarthy, J. J., & Ottino, J. M. (1999). Mixing and segregation of granular materials in chute flows. *Chaos*, 9(3), 594–610. <https://doi.org/10.1063/1.166433>

4. Marigo, M., & Stitt, E. (2015). Discrete Element Method (DEM) for industrial applications. *KONA Powder and Particle Journal*, 32, 236–252. <https://doi.org/10.14356/kona.2015016>

5. Bonn, D., Denn, M. M., Berthier, L., Divoux, T., & Manneville, S. (2017). Yield stress materials in soft condensed matter. *Reviews of Modern Physics*, 89(3), 035005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035005>

6. Kupchuk, I. (2025). Physical principles and classification of feed material mixing processes. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, (4(131)), 55–68. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-6>

7. Ottino, J. M. (1989). *The kinematics of mixing: Stretching, chaos, and transport*. Cambridge University Press.

8. Haken, H. (2004). *Synergetics: Introduction and advanced topics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10184-1>

9. Bertalanffy, L. (1973). *General system theory: Foundations, development, applications*. George Braziller.

10. Jaeger, H. M., Nagel, S. R., & Behringer, R. P. (1996). Granular solids, liquids, and gases. *Reviews of Modern Physics*, 68, 1259–1273. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.68.1259>

11. Forterre, Y., & Pouliquen, O. (2008). Flows of dense granular media. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40, 1–24. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.1.11406.102142>

12. Schulze, D. (2021). *Powders and bulk solids: Behavior, characterization, storage and flow*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-76720-4>

13. Divoux, T., Fardin, M. A., Manneville, S., &

Lerouge, S. (2016). Shear banding in complex fluids. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 48, 81–103. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122414-034416>

14. Gray, J. M. N. T., & Thornton, A. R. (2005). A theory for particle size segregation in shallow granular free-surface flows. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 461, 1447–1473. <https://doi.org/10.1098/rspa.2004.1420>

15. Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (2008). *Non-Newtonian flow and applied rheology* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8532-0.X0001-7>

16. Polievoda, Yu. A., Volynets, Ye. O., & Bystrytskyi, O. P. (2022). Matematychna konteineri vibrozmišuvacha [Mathematical model of particle motion in a cylindrical container of a vibratory mixer]. *Vibrations in Engineering and Technology*, (4(107)), 20–25. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-4-3>

17. Stadnik, M., Solona, O., & Burlaka, S. (2025). Doslidzhennia vplyvu heometrii robochykh orhaniv zmishuvacha na kinetiku zmishuvannia sypkykh seredovyshch [Investigation of the influence of working body geometry on the mixing kinetics of granular media]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, (2(349)), 23–27. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-2>

18. Stadnik, M., Babyn, I., Luts, P., & Ripa, S. (2024). Analiz teoretychnykh doslidzhen prystroiv dozuvannia ta zmishuvannia zhyvylynykh rozchyniv [Analysis of theoretical studies of dosing and mixing devices for nutrient solutions]. *Vibrations in Engineering and Technology*, (3(114)), 90–96. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-3-11>

DESCRIPTOR-BASED APPROACH TO THE DESCRIPTION OF FEED MATERIAL MIXING PROCESSES

The article proposes a systemic descriptor-based approach to describing the mixing processes of multicomponent feed materials, within which the process is interpreted as the evolution of a state in a multidimensional space of physically interpretable coordinates. The relevance of the study is determined by the complex rheological nature of feed mixtures, which combine frictional, cohesive, fibrous, and viscoplastic components characterized by spatial and temporal heterogeneity of stress-strain states. The traditional mechanistic description through individual mixing mechanisms does not provide a coherent coordinate-based language for analyzing process regimes and transitions between them.

The aim of the research is to establish a



generalized state space of the mixing process and to structure the interrelationships between descriptors as coordinates of this space. The methodological foundation of the research includes conceptual modeling, structural-logical analysis, and physical interpretation of constraints arising from the mechanics of granular and viscoplastic media. The process state is represented as a vector of descriptors D_1 - D_9 , grouped into four functional blocks: material-microstructural, deformation-energetic, flow-topological, and evolutionary-stabilization.

It is shown that mixing regimes should be interpreted as subregions of an admissible state space formed with consideration of physical, rheological, and structural-topological constraints. Three types of structural relationships between descriptors are identified: physical incompatibility, conditional dominance, and hierarchical subordination. The combined effect of these relationships shapes the internal geometry of the state space, determines the stratification of regime

domains, and defines the admissibility of coordinate combinations. It is substantiated that the "narrowing" of the space of possible states is a consequence of the physical properties of the material medium rather than a formal modeling assumption.

The proposed approach enables a transition from an empirically oriented description of the mixing process to its systemic interpretation as a structured set of physically admissible states. This provides a methodological basis for further quantitative parameterization of process evolution, the development of regime stability criteria, and the optimization of operating modes of mixing apparatuses of various design types.

Keywords: mixing regime behavior, multidimensional state space, structural-topological flow organization, admissible process domains, descriptor hierarchy, regime stratification, systemic formalization of mixing.

Відомості про автора

Купчук Ігор Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК, інженерно-технологічний факультет, Вінницький національний аграрний університет (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: kupchuk.igor@i.ua; <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

Kupchuk Ihor – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate Professor of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in the Agricultural Industry, Faculty of Engineering and Technology, Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: kupchuk.igor@i.ua; <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

Стаття надійшла 17.02.2026

Стаття прийнята 22.02.2026

Опубліковано 17.04.2026