



НАУКОВІ ОСНОВИ ІННОВАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

<https://doi.org/10.15407/scin16.02.045>

Д.О. БАННИКОВ, О.Л. ТЮТЬКІН

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна,
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна,
+380 63 400 4307, +380 66 290 4518, bdo2020@yahoo.com

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ МЕХАНІКИ СИПУЧОГО СЕРЕДОВИЩА

Вступ. На сьогодні в галузі механіки сипучого середовища існує серйозна ключова проблема, яка полягає у відсутності єдиної теоретичної концепції розгляду поведінки сипучого середовища в різних практичних умовах. Це суттєво гальмує подальший розвиток зазначеної галузі, адже окремі теоретичні моделі сипучого матеріалу, яких налічується біля 30, практично не узгоджені між собою.

Проблематика. На практиці окреслена проблема призводить до численних випадків відмов та аварій будівельних конструкцій різних типів, що є наслідком помилок при визначенні навантажень від сипучої речовини.

Мета. Визначення та формулювання основних сучасних напрямів подальшого розвитку механіки сипучого середовища, як окремого розділу механіки ґрунтів у складі геотехнічної механіки. Розробка цих напрямів є рішенням до подолання проблеми створення єдиної теоретичної моделі сипучої речовини.

Матеріали й методи. Систематизація та узагальнення накопиченого масиву інформації щодо механіки сипучого середовища та розробка на основі цього єдиного підходу до опису його поведінки є основним методом досягнення сформульованої мети.

Результати. Основними передумовами формування концепції сипучого середовища є проведення досліджень в трьох напрямках: визначення властивостей сипучих матеріалів; визначення коефіцієнту передачі тиску; побудова моделі укладки.

Висновки. Базовою концепцією побудови єдиної теоретичної моделі сипучого середовища повинен бути дискретно-континуальний підхід. При цьому всі властивості сипучого середовища визначаються, виходячи з його дискретної природи, а рівняння статичної рівноваги та динамічного руху сипучого середовища формуються, розглядаючи його як однорідне континуальне середовище в межах певного об'єму. Також статична поведінка сипучого середовища має аналізуватися як частковий випадок його динамічної поведінки, а не як окрема самостійна задача зі своїми власними параметрами.

Ключові слова: сипуче середовище, сипучий матеріал, геотехнічна механіка, дискретно-континуальна модель.

Сипуче середовище займає особливе місце серед інших видів середовищ, які вивчає механіка як окрема фундаментальна наука. Воно не належить ані до твердих тіл, ані до рідин (газів). Саме тому дослідженням особливостей сипучого середовища зай-

Цитування: Банніков Д.О., Тютькін О.Л. Перспективні напрями розвитку механіки сипучого середовища. *Nauka innov.* 2020. Т. 16, № 2. С. 45–54. <https://doi.org/10.15407/scin16.02.045>



Рис. 1. Аварія сталевго силосу для зберігання зерна

мається окремий напрям механіки ґрунтів у складі геотехнічної механіки — механіка сипучого середовища.

Зародження цієї науки пов'язують із роботами М. Бюлле кінця XVII ст. За минулі, більш, ніж 300, років кількість проведених теоретичних та експериментальних досліджень, що сформувавши теоретичні засади механіки сипучого середовища, обчислюється сотнями тисяч. Простий перелік тільки прізвищ авторів цих досліджень міг б зайняти, принаймні, окремий енциклопедичний том. Проте, чи то завдяки особливостям сипучого середовища, чи то особливостям існуючих методів досліджень, значна кількість виконаних досліджень не можуть дати відповіді на ключові питання, а отримані результати та прогнози моделі відверто суперечать одна іншій, як у якісному співвідношенні, так і кількісно.

Багатьма сучасними дослідниками визнано той факт, що на сьогодні відсутня єдина фізична модель сипучого середовища, що, в свою чергу, суттєво ускладнює проектування різноманітних машинобудівних та будівельних конструкцій, які транспортують, перевантажують та зберігають сипучу речовину — конвеєри, жолоби, транспортери, бункери тощо. В практиці це призводить до численних випадків відмов і аварій таких конструкцій, як, наприклад, силосів для зберігання сільськогосподарської продукції та зерна або бункерів

для зберігання та накопичення рудного агломерату та вугілля (рис. 1, 2). Причому, відповідно до зібраних авторами статистичних даних, приблизно біля 50 % аварій та відмов конструкцій такого типу так чи інакше пов'язана з помилками при визначенні навантажень від сипучої речовини.

У вітчизняних нормах ДБН В.2.2-8-98 [1], що є, фактично, тотожним перекладом попередніх норм СНиП 2.10.05-85, використовуються дві теоретичні моделі для опису статичної роботи сипучої речовини в ємнісних будівельних конструкціях — Ш. Кулона та Г.А. Янсена. Перша — це адаптована до ґрунтових масивів гідростатична модель ньютонівської рідини, і галуззю застосування її є проектування невисоких ємностей для сипучих матеріалів (бункерів). Друга — це вдосконалена за рахунок поправочних коефіцієнтів «чиста» модель Г.А. Янсена, яку використовують для проектування високих ємностей для сипучих матеріалів (силосів).

В національному стандарті ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 [2], який є перекладеними та адаптованими європейськими норми Eurocode EN 1991-4:2006, базовою теоретичною моделлю є модель Г.А. Янсена. Проте її доповнено системою спеціальних виразів, як для статичних місцевих тисків в різних ділянках замкненої ємнісної конструкції, так і для динамічних процесів руху сипучого матеріалу залежно від конструктивного рішення самої споруди.

Співставлення цих нормативних документів виконано в низці сучасних робіт (див., наприклад, [3]), з яких випливає, що тиск сипучого матеріалу, за європейськими нормами, виявляється приблизно вдвічі вищим за аналогічний тиск, визначений відповідно до вітчизняних норм. І це, не зважаючи на те, що у вітчизняних нормах присутні спеціальні поправочні коефіцієнти до розрахункових виразів, величина яких для деяких частин будівельних споруд сягає 2,0.

Сучасна вітчизняна фахова література з питань механіки сипучого середовища в основ-

ному має оглядовий характер [4, 5] — в роботах наведено основні моделі для різних видів та випадків застосування сипучих матеріалів. Особливо цікавою при цьому є спеціалізована фахова література [6–8], в якій фактично, узагальнюється майже весь вітчизняний досвід в окремих напрямках виробництва.

Сучасна закордонна література з проблематики сипучого середовища зосереджена переважно на проблемах коректного моделювання сипучого матеріалу та врахування їх властивостей, здебільшого засобами наявних комп'ютерних методів [9, 10]. Інша частина публікацій присвячена описам особливостей роботи сипучих матеріалів в різноманітних умовах, часто нестандартних [11]. На увагу заслуговує також довідкова література [12–14], яка узагальнює накопичений закордонний практичний досвід.

Таким чином, вище наведений огляд бібліографічних джерел, дозволяє констатувати, що основною проблемою на сьогодні, як вже зазначалося, є суттєва кількість розроблених та запропонованих теоретичних моделей сипучого середовища. За авторськими підрахунками їх налічується близько 30, причому офіційно визнаними (тобто такими, які включено до нормативних документів різних країн) є не більше 5.

Всі наявні моделі сипучого середовища було згруповано в три основні різновиди — континуальні, дискретні та дискретно-континуальні [15]. Проте на практиці подібне розмаїття моделей не тільки не покращує ситуацію, а й призводить до складнощів в проектуванні різних видів конструкцій та до серйозних аварій під час їх експлуатації [16].

Одним з можливих шляхів виходу із зазначеної ситуації вбачається систематизація та узагальнення всього накопиченого масиву інформації щодо механіки сипучого середовища та розробку на цій основі єдиного підходу до опису його поведінки. В свою чергу, вирішення окресленої проблеми можливо лише поступово, базуючись на вирішенні більш дрібних завдань, кожне з яких обмежується низкою фак-



Рис. 2. Пошкодження сталевих бункерів для зберігання рудного агломерату: *a* — розриви ребер жорсткості; *б* — руйнування футерівки

торів, що суттєво перешкоджають його розв'язанню. Тому метою роботи є виокремлення зазначених завдань, розв'язання яких в сукупності призведе до подолання проблеми створення єдиної теоретичної моделі сипучої речовини, а також до виявлення обмежуючих факторів в кожному випадку. Такі окремі в роботі названо напрямками досліджень, а їх аналіз супроводжується відповідними авторськими напрацюваннями і поглядами.

Існуюча механіка сипучого середовища фактично є сукупністю окремих теоретичних та практичних задач. Кожна з них є відносно самостійною, розглядається та вирішується, виходячи з власних передумов, та має власні теоретичні уявлення про сипучу речовину, що реа-

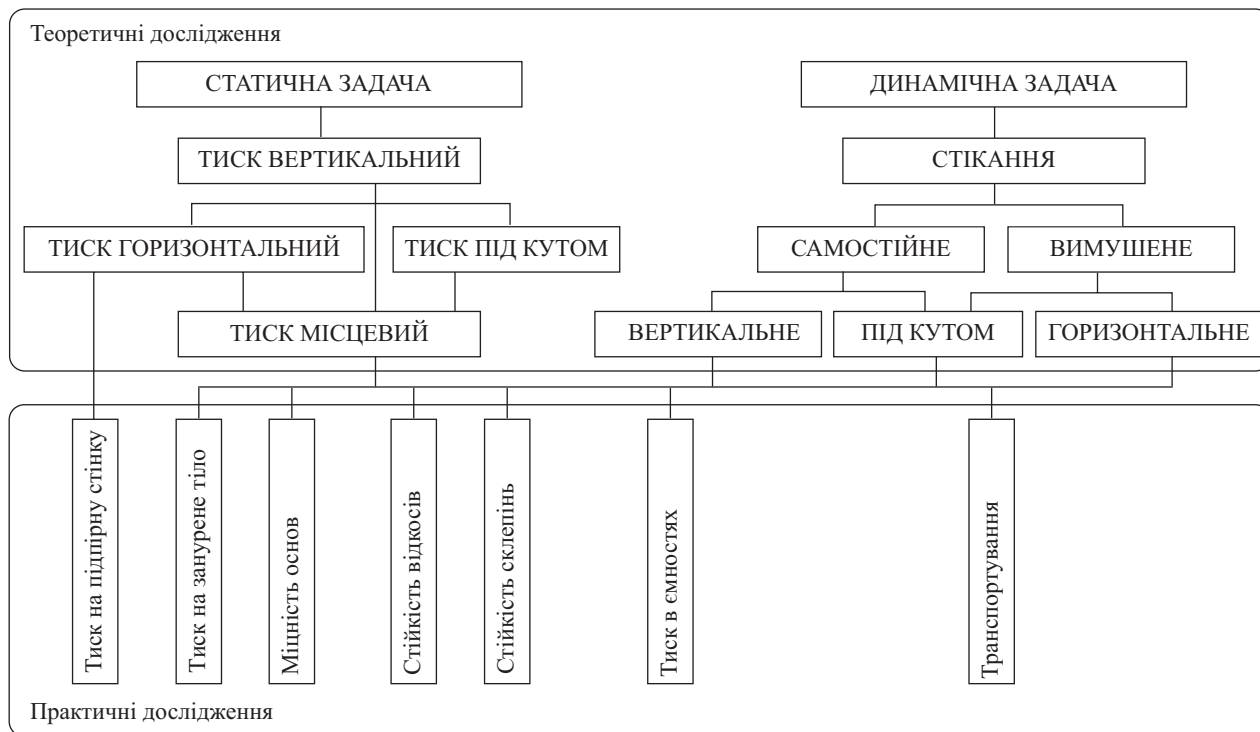


Рис. 3. Основні сучасні задачі механіки сипучого середовища

лізується у використанні власних теоретичних моделей, які часто суперечать між собою.

Авторську класифікацію основних подібних задач наведено на рис. 3. На схемі в горизонтальних прямокутниках показано теоретичні задачі, а у вертикальних – практичні, що вирішуються на їх основі. Лінії, що з’єднують прямокутники, означають використання відповідних результатів інших задач.

В свою чергу, кожна подібна задача може бути поділена на окремі підзадачі, які пов’язані із врахуванням/неврахуванням симетрії, форми обмежуючих поверхонь (за їх наявності), зернового складу сипучої речовини (наприклад, дрібнозернистий/крупнозернистий).

Таким чином, механіку сипучої речовини можна умовно розділити на окремі «підмеханіки» із власними аксіоматичними припущеннями та відповідними факторами, що враховуються.

На думку автора, такий підхід є принципово та концептуально помилковим. Всі окремі розрізнені задачі повинні зводитися до однієї те-

оретичної моделі сипучого середовища та бути лише частковими випадками, коли певні параметри перетворюються на нуль або на нескінченність. Основними напрямками, що сприятимуть подібному подальшому розвитку механіки сипучого середовища є наступні.

1. *Визначення властивостей сипучих матеріалів.* Окресленому питанню сьогодні приділено досить значну кількість уваги. Проте багато в чому воно залишається нерозкритим і навіть суттєво заплутаним.

Справа в тому, що піонери-дослідники сипучої речовини, наприклад ще в першій половині XX ст. професор І.П. Прокоф’єв, як характеристики опису властивостей сипучої речовини, виділяли всього три показники: густину, кут природнього відкосу і кут внутрішнього тертя.

Станом на сьогодні ситуація значно ускладнилася. У вітчизняних нормах [1] наведено вже п’ять характеристик – окрім зазначених вище трьох, додатково враховують кут зовнішнього тертя об матеріал ємності, в якій знаходиться

сипуча речовина, а також модуль деформації стиску сипучої речовини.

В закордонних нормах [2] властивості сипучої речовини описано, окрім зазначених п'яти характеристик, ще трьома: питома вага в підвищеному стані, коефіцієнт Пуассона й коефіцієнт зчеплення. Таким чином, загальна кількість характеристик складає вісім.

Сучасні дослідники, як вітчизняні [4, 5], так і закордонні [9–11], зазначають, що такої кількості характеристик недостатньо і за їх допомогою неможливо коректно описати поведінку сипучої речовини в подальшому та побудувати її теоретичну модель. Для цього необхідно щонайменше 20 різних характеристик, серед яких фігурують характеристики, що описують розмір зерен сипучого матеріалу, як наприклад, середній діаметр групи зерен сипучого матеріалу, а також його еквівалентні варіації — середній гармонійний діаметр, середній діаметр за Лашингером, середній діаметр за Мюллером, середній діаметр за Андреазеном, середній діаметр форми, середній діаметр суміші. Характеристики, що враховують структурну побудову сипучого матеріалу, також описуються численними параметрами — кут укладки зерен матеріалу, кут насипання матеріалу, кут обвалення матеріалу, пористість, об'єм пор, коефіцієнт густини укладки.

Окрім того, для кожної характеристики наводять і різні, як правило, новітні методи її кількісного визначення. При цьому досить часто потрібно, щоб окремі характеристики сипучого середовища вже були відомі (наприклад, густина або кут внутрішнього тертя), а інші, додаткові, визначають на їх основі. Тобто вони не є незалежними в повному розумінні та, відповідно, похибки при визначенні перших характеристик викривляють значення цих похідних характеристик.

До того ж, навіть, методи визначення «класичних» характеристик сипучої речовини, на кшталт густини, різняться між собою. Так, наприклад, визначення насипної густини може виконуватись п'ятьма різними способами — зва-

жування у псевдозрідженому шарі, гідростатичне зважування, газова пікнометрія, метод фізичного маятника та метод секційного ротору.

Окремої уваги заслуговує така характеристика сипучої речовини, як зчеплення між її окремими зернами. Стосовно цього параметру досить часто виникає просто підміна понять, яка призводить на практиці до побудови абсолютно нереалістичних моделей.

Так, багатьма фахівцями прийнято, що сипучий матеріал в його класичному розумінні позбавлений будь-якого зчеплення між окремими зернами. Між ними виникають лише зусилля стиску та тертя. Проте при певному фізичному впливі (наприклад, обтиску) або підвищенню вмісту рідини в матеріалі (наприклад, за рахунок природньої абсорбції з атмосфери) між окремими зернами виникають зв'язки, що породжують сили розтягу. При певному навантаженні такі зв'язки руйнуються і зерна відокремлюються одне від іншого. Такі процеси мають місце у ґрунтах, наприклад глинистих. Проте, побудовані для цього випадку закономірності нерідко розповсюджуються на інші види матеріалів, наприклад, ті ж подрібнені скельні ґрунти, які навіть у зволоженому стані мають настільки низькі характеристики зчеплення, що ними просто можна нехтувати.

Саме тому механіка сипучих середовищ має чітко розрізняти ці дві категорії речовин — які мають зчеплення, та без нього. На думку автора, саме у другому випадку й може бути використано термін «сипучий матеріал».

На наш погляд, таке розмаїття сучасних характеристик сипучого середовища обумовлено зерною структурою сипучої речовини, яка складається з окремих частинок різного (фактично, довільного) геометричного розміру та форми, завдяки яким між часточками утворюються порожнечі. Для математичного опису такої структури авторами запропоновано використати методи фрактальної геометрії. Безумовно, це призводить до певних математичних складнощів, проте дозволяє в аналітичному вигляді подати всі структурні особливості речовини,

скоротивши таким чином кількість їх характеристик. Одним з можливих фракталів для цього випадку може бути адаптований фрактал Чебишева для тривимірної задачі.

З іншого боку, аналітичне представлення структурованості сипучої речовини дозволяє перейти до її моделювання за допомогою одного з чисельних методів будівельної механіки – методу скінчених елементів. При цьому, параметри спеціального скінченого елемента мають задаватися не традиційним шляхом, за рахунок усереднених характеристик сипучого середовища, а за допомогою аналітичних фрактальних виразів. Дослідження в цьому напрямку сьогодні активно проводяться авторами.

2. Визначення коефіцієнту передачі (тиску). Це питання є одним з базових для подальшої побудови будь-якої теоретичної моделі сипучої речовини. Традиційно розглядається коефіцієнт бокового тиску K . Його ключова роль у багатьох моделях сипучої речовини полягає в пов'язуванні між собою вертикального тиску в матеріалі на певній глибині із горизонтальним тиском.

Для рідин зазначений коефіцієнт дорівнює 1, що означає однакову передачу тиску у всіх напрямках. Для сипучих матеріалів значення цього коефіцієнта декларуються нормами [1, 2] і становить менше 1, що означає передачу тиску зі зменшенням. Проте окремі автори вказу-

ють на те, що коефіцієнт бокового тиску може приймати значення й більше 1 (!), хоча відносять вони цей випадок до ґрунтів, які було піддано попередньому стисканню (наприклад, за рахунок шару криги під час льодовикового періоду). Для сипучого матеріалу, особливо у насипному стані, такі дані відсутні.

Таким чином, для сипучої речовини питання щодо визначення коефіцієнту бокового тиску залишається відкритим й досі. В усіх офіційно визнаних моделях сипучої речовини [1, 2] коефіцієнт бокового тиску визначається за виразом, отриманим В. Ренкіним для випадку рівноваги сипучого клину у необмеженому масиві.

Згодом було запропоновано низку інших виразів для визначення зазначеного коефіцієнту, найбільш відомі з яких наведено в табл. 1. В цій таблиці також подано кількісні значення, які може приймати цей коефіцієнт залежно від основної, як вважається, визначальної фізико-механічної характеристики сипучої речовини – кута внутрішнього тертя ψ .

Слід зауважити, що всі наведені вирази було отримано при розгляді сипучої речовини як континуального масиву, тобто без урахування геометрії та структури сипучої речовини, а також до уваги практично не приймається взаємодія сипучого матеріалу із елементами поверхні, на яку визначається її тиск. Зокрема, без уваги залишається тертя зерен матеріалу об стінки або утворення вздовж поверхні, так званого, поверхневого шару товщиною в декілька зерен, встановленого автором під час експериментальних досліджень. Зазначений шар має специфічну структуру, яка відрізняється від структури основної маси сипучого матеріалу та мало залежить від кута нахилу поверхні контакту (рис. 4).

Окремим аспектом розглянутого напряму досліджень є визначення коефіцієнту бокового тиску не для вертикальної поверхні, а для поверхні, нахиленої під довільним кутом до вертикалі. При цьому сама назва коефіцієнту вже стає не коректною та має бути зміненою на іншу, наприклад, коефіцієнт передачі тиску.

Таблиця 1. Визначення коефіцієнту бічного тиску сипучої речовини

Автор формули	Формула	Значення коефіцієнту K при ψ		
		15°	25°	35°
В. Ренкін	$K = \frac{1 - \sin\psi}{1 + \sin\psi}$	0,59	0,41	0,27
М. Жакі	$K = 1 - \sin\psi$	0,74	0,58	0,43
Дж. Біарез	$K = \frac{1 - \sin\psi}{\cos\psi}$	0,77	0,64	0,52
Г.І. Покровський	$K = 1 - 0,74 \tan\psi$	0,80	0,66	0,48
Л.В. Гячев	$K = \frac{1,5}{2 - 1,75 \tan\psi}$	0,61	0,53	0,47

Спроба вирішити цю задачу була виконана ще на початку ХХ ст. професором І.П. Прокоф'євим. Ним було отримано рішення для стану граничної рівноваги сипучого матеріалу з якого випливало, що коефіцієнт бокового тиску збільшується зі збільшенням відхилення поверхні, на яку відбувається тиск, від вертикалі.

Сучасні вітчизняні дослідники [1] не розглядають цього питання, вважаючи передачу тиску на нахилену поверхню в сипучому матеріалі аналогічною для твердого тіла. Закордонні фахівці [2] супроводжують аналогічний підхід спеціальним поправочним коефіцієнтом, визначеними переважно результатами експериментальних досліджень.

3. Побудова моделі укладки зерен сипучої речовини. Наступним базовим аспектом дослідження сипучої речовини є розробка моделі укладки її зерен, яка б була максимально вірогідною та експериментально підтвердженою.

Серед припущень, які мають враховуватися при розробці цієї моделі, наведено такі:

- ◆ окремі зерна намагаються зайняти якомога найнижче положення під дією власної маси;
- ◆ найбільш щільним є випадок укладання, коли відстані між центрами суміжних зерен є найкоротшими;
- ◆ під час руху сипучого матеріалу вищезазначені припущення зберігаються.

Врахування цих факторів було виконано в ході теоретико-експериментальних досліджень та детально викладено в монографії [15]. Проте використана там модель укладки зерен сипучої речовини є досить простою – прийнято зерна однакової геометричної форми та укладання їх геометрично рівними рядами по три шари (рис. 5), що, очевидно, є спрощенням. Верхній ряд утворюється зернами *A*, *B* і *C*, нижній ряд – зернами *D*, *E* і *F*. Проміжний шар (крайні зерна позначено цифрами) розташовується між зазначеними шарами, так, щоб зерна крайніх шарів займали найнижче можливе положення.

Якщо у випадку плоскої стінки, на яку сипучий матеріал чинить певний тиск, модель ук-

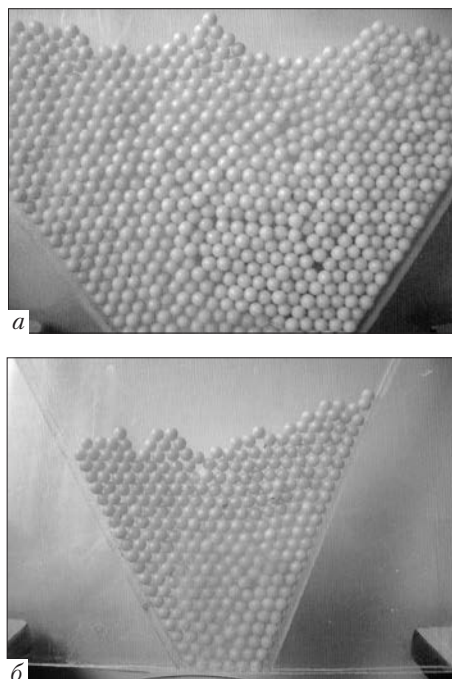


Рис. 4. Поверхневий шар сипучого матеріалу при куті нахилу бічної поверхні 50° (а) і 65° (б)

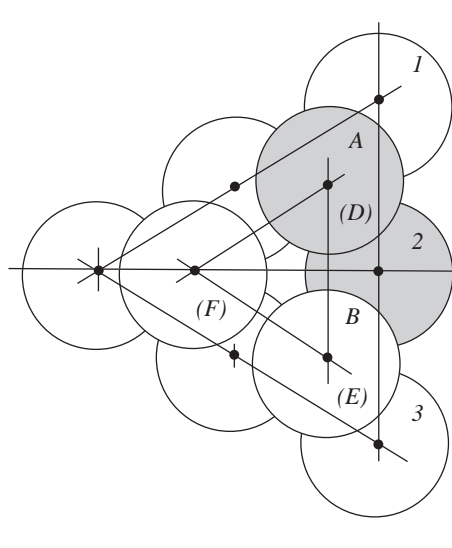


Рис. 5. Рівномірна просторова укладка зерен сипучої речовини: *A-C* – зерна верхнього шару; *D-F* – зерна нижнього шару; *1-3* – зерна бокового шару

ладки є відносно зрозумілою, то у випадку негладкої стінки питання суттєво ускладнюється. Фактично, дані щодо характеру розподілу зерен сипучого матеріалу для поверхонь різних

геометричних форм на тепер відсутні. Проте в практиці останнім часом досить часто застосовують ємнісні споруди із різноманітними гофрованими стінками. Вочевидь, використання традиційних моделей для цього випадку є однозначно помилковим та потребує спеціальних досліджень на зразок тих, які розпочаті авторами [17].

Традиційно в теорії сипучої речовини статична та динамічна поведінка сипучого матеріалу розглядаються як дві різні задачі. Пояснення такому підходу у деяких авторів полягає у складності процесів руху сипучого та «непередбачуваності» цього явища.

Між тим, механіка як фундаментальна наука розглядає відсутність руху будь-якого об'єкту, тобто статичну задачу, як лише частковий випадок динамічної задачі. А вся «непередбачуваність» у випадку сипучої речовини зводиться до виникнення низки специфічних динамічних ефектів, на зразок місцевих підвищених тисків або пульсацій при русі.

На думку авторів, передумовами такої ситуації є саме відсутність визначеності стосовно трьох попередніх питань (напрямів), розглянутих вище. Це призводить до відсутності на сьогодні єдиного теоретичного підходу до опису поведінки сипучого середовища, причому навіть загальна концепція такого підходу є досить розмитою й неузгодженою.

З усіх існуючих та наведених концепцій найбільш універсальною є дискретно-континуальний підхід. При цьому всі властивості сипучого середовища визначають, виходячи з його дискретної природи на основі експериментально визначених моделей укладки для різних практичних випадків. На підставі цього, за допомогою математичного апарату, може бути визначено коефіцієнт бічного тиску (можливо, навіть, декілька значень для різних практичних випадків). Безпосередньо ж рішення статичної рівноваги та динамічного руху сипучого середовища формують, розгляда-

ючи його як однорідне континуальне середовище в межах певного об'єму.

Результатом такого підходу може бути отримання не одного, а декількох практичних рішень для різних вихідних передумов, як наприклад показано в роботі [15].

Аналізуючи все вищевикладене, можна узагальнити основні напрями сучасного розвитку механіки сипучого середовища та проведення подальших досліджень.

1. На сьогодні відсутня єдина концепція розробки теоретичної моделі сипучого середовища, а всі наявні моделі мають суперечливий характер, є вузькоспеціальними та не відповідають експериментальним даним й практичним ситуаціям.

2. Базовою концепцією побудови теоретичної моделі сипучого середовища має бути дискретно-континуальний підхід. При цьому всі властивості сипучого середовища визначаються виходячи з його дискретної природи, а рішення статичної рівноваги та динамічного руху сипучого середовища формуються, розглядаючи його як однорідне континуальне середовище в межах певного об'єму.

3. Основними передумовами формування концепції сипучого середовища є проведення досліджень в трьох напрямках:

- ◆ визначення властивостей сипучих матеріалів;
- ◆ визначення коефіцієнту передачі тиску;
- ◆ побудова моделі укладки зерен сипучої речовини.

4. На основі концептуального розв'язання цих трьох проблемних питань надалі з'являються можливості для більш детального дослідження окремих часткових задач і вивчення фізико-механічних процесів в самому сипучому середовищі. До таких задач, в першу чергу, слід віднести дилатансію, контрактансію, утворення полос локалізації деформації, сегрегацію, стратифікацію, скупчення, утворення склепінь, утворення поверхневого шару, фільтраційний витік сипучого матеріалу з отворів, тощо.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. Київ, 1998. 41 с.
2. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари. Київ, 2012. 168 с.
3. Бібік М.В., Мороз П.С. Визначення горизонтального навантаження на вертикальні стіни ємнісних конструкцій за різними нормами. *Збірник наукових праць ПолтНТУ (галузеве машинобудування, будівництво)*. 2014. Вип. 1(40). С. 166–174.
4. Ляпцев С., Афанасьев А., Чиркова А. Резонансные вибротранспортные машины для сыпучих материалов. LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 196 с.
5. Вобликов Е.М. Технология элеваторной промышленности. Санкт-Петербург, 2010. 384 с.
6. Винокуров К.В., Никоноров С.Н. Элеваторы, склады, зерносушилки. Саратов, 2008. 88 с.
7. Горюшинский И.В., Кононов И.И., Денисов В.В., Горюшинская Е.В., Петрушкин Н.В. Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах. Под общ. ред. И.В. Горюшинского. Самара, 2003. 232 с.
8. Семенов В.Ф. Бункеры и хранилища зерна. Барнаул, 1999. 222 с.
9. Franklin S.V., Shattuck M.D. (Eds.). *Handbook of Granular Materials*. CRC Press, 2015. 522 p. doi.org/10.1201/b19291.
10. Sakellariou M. (Ed.). *Granular Materials*. InTech, 2017. doi.org/10.5772/66007.
11. Cambou V., Magoerics H., Nguyen N.-S. *Granular Materials at Meso-Scale*. Elsevier LTD, 2016. 164 p. doi.org/10.1016/c2015-0-01312-0.
12. ESDEP WG: Vol. 15: Structural Systems. Bins: Lecture 15C.2. 34 p.
13. Edwin H., Gaylord Jr., Charles N. Gaylord, James E. Stallmeyer (Eds.). *Structural Engineering Handbook*. McGraw-Hill, 1997. 624 p.
14. Fruchtbau J. *Bulk Materials Handling Handbook*. SpringerLink, 1988. 488 p. doi.org/10.1007/978-1-4757-4695-2.
15. Банніков Д.О. Сипучий матеріал в ємнісній конструкції. Дніпропетровськ, 2009. 172 с.
16. Качуренко В.В., Банніков Д.О. Конструктивні рішення сталевих ємкостей для сипучих матеріалів. Дніпропетровськ, 2016. 168 с.
17. Качуренко В.В., Банніков Д.О. Особливості моделювання тиску сипучого матеріалу на гофровані сталеві елементи. *Збірник наукових праць «Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»*. 2014. Вип. 28. С. 367–376.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.12.18

Статтю прорецензовано / Revised 04.04.19

Статтю підписано до друку / Accepted 07.05.19

Bannikov, D.O. and Tiutkin, O.L.

Lazaryan Dnipro National University
of Railway Transport

2, Lazaryan St., Dnipro, 49010, Ukraine,
+380 63 400 4307, +380 66 290 4518, bdo2020@yahoo.com

PROSPECTING DIRECTIONS OF THE DEVELOPMENT OF LOOSE MEDIUM MECHANICS

Introduction. At present, in the field of loose medium mechanics there is a rather serious key problem, the absence of a universal theoretical concept for considering the behavior of the loose medium under different practical conditions. Such situation significantly impedes the further development of this industry, since theoretical models of bulk material, which now have been counted about 30, practically conflict with each other.

Problem Statement. In practice, such problem leads to numerous cases of failures of structures of various types, as a result of errors in determining the loads from the bulk material.

Purpose. Identification and formulation of the main directions of the further development of loose medium mechanics as a separate section of soil mechanics in the composition of geotechnical mechanics. The development of these directions is a solution for overcoming the problem of creating a unified theoretical model of loose medium.

Materials and Methods. The systematization and the synthesis of the accumulated information on loose medium mechanics and the development of a universal approach to describing its behavior is the main method to achieve the formulated purpose.

Results. Researching in three directions is the main prerequisite for the formation of the concept of loose medium. These directions are the determination of the properties of loose materials; the determination of the pressure ratio; and the development of a model for packing grains of loose material.

Conclusions. The discrete-continuum approach shall be basic concept for developing the unified theoretical model of loose medium. At the same time, all properties of loose medium are determined on the basis of its discrete nature; the equations of static equilibrium and the dynamic motion of the loose medium are formed considering it as a homogeneous continuum within a certain volume. Also, the static behavior of loose medium shall be analyzed as a partial case of its dynamic behavior rather than as an individual task with its own parameters.

Keywords: loose medium, bulk material, geotechnical mechanics, and discrete-continuum model.