

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

ОСМЕНКО ІГОР ВІКТОРОВИЧ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
завідувач кафедри механізації
сільського господарства
канд. техн. наук, доцент
_____ Анатолій ПОЛЯКОВ
« ____ » _____ 2023 р.

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧИХ
ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН
З ҐРУНТОВИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Спеціальність 208 Агроінженерія

Кваліфікаційна робота
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Керівник:

канд. техн. наук, доцент
Олексій ОВЧАРЕНКО

Оцінка: _____ / _____ / _____
бали/за шкалою ЄКТС/за національною шкалою

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Осменко І. В. Моделювання взаємодії робочих органів сільськогосподарських машин з ґрунтовим середовищем : кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» : 208 Агроінженерія / Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. Київ, 2023. 87 с.

У кваліфікаційній роботі розглянути сучасний стан моделювання процесів ґрунтообробітку та розроблена власна модель ґрунтового середовища на основі неньютонівської рідини Бінгама. За допомогою підібраних базових досліджень з ґрунтообробітку визначені функціональні залежності між характеристиками реального ґрунту та середовища Бінгама.

Ключові слова: моделювання, ґрунтообробіток, Ansys CFX, гідродинаміка, метод скінченних елементів, середовище Бінгама.

Кваліфікаційна робота: 87 сторінок, 20 таблиць, 31 рисунків, 66 літературних джерел.

ABSTRACT

Osmenko I. V. Modelling the interaction of working bodies of agricultural machines with the soil environment: qualification work for the degree of Master's degree: 208 Agroengineering / Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. Kyiv, 2023. 87 c.

The qualification work considers the current state of modelling of soil cultivation processes and develops its own model of the soil environment based on the non-Newtonian Bingham fluid. With the help of selected basic studies on soil cultivation, the functional dependencies between the characteristics of real soil and the Bingham's medium are determined.

Keywords: modelling, soil cultivation, Ansys CFX, hydrodynamics, finite element method, Bingham's medium.

Qualification work: 87 pages, 20 tables, 31 figures, 66 references.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГРУНТООБРОБІТКУ	8
1.1 Основні фізико-механічні властивості ґрунту	8
1.2 Огляд сучасних моделей ґрунту при моделюванні роботи ґрунтообробних знарядь	10
1.3 Вибір достовірних результатів досліджень взаємодії елементарного робочого органу з реальним ґрунтом	19
1.3.1. Достовірність досліджень взаємодії робочих органів з ґрунтом	20
1.3.2. Види робочих органів	22
1.3.3. Вибір базових досліджень	22
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ, НА ОСНОВІ НЕНЬЮТОНІВСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА БІНГАМА	30
2.1 Постановка завдання	30
2.2 Завдання матеріалу ґрунтового середовища	31
2.3 Побудова геометричної моделі	38
2.4 Побудова сітки скінченних елементів	40
2.5 Завдання граничних умов	42
2.6 Розрахунок	44
2.7 Постпроцесорна обробка результатів	45
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РЕАЛЬНОГО ҐРУНТУ І СЕРЕДОВИЩЕМ БІНГАМА	47
3.1 Методика досліджень	47
3.3 План експерименту	50
3.4 Аналіз отриманих результатів	51
ВИСНОВКИ	70

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	71
ДОДАТОК А.....	78

ВСТУП

Запорукою успішності сучасних наукових досліджень, а також будь-яких розрахунків і розробок являється точність, достовірність і економічна доцільність пропонованого продукту. Усе це повинно бути виконано в найкоротші терміни і з мінімальними витратами. Це можливо тільки за однієї умови – широке використання моделей в процесі роботи. Серед усього різноманіття існуючих моделей найбільш перспективними є імітаційні моделі, що реалізуються за допомогою сучасних інформаційних технологій.

Усе це в найвищій мірі відноситься до аграрного виробництва і зокрема до розробок пов'язаних із вдосконаленням ґрунтообробних знарядь. У зв'язку із складністю процесів що протікають в ґрунті саме цей напрямок все ще залишається недостатньо розвинутим з точки зору моделювання та широкого використання інформаційних технологій.

Актуальність теми

Стрімкий розвиток електронної обчислювальної техніки дав можливість інженерам перекласти на «плечі» комп'ютерів складні процеси розрахунків, залишивши у зоні відповідальності людини лише елементи творчості. Але існуючі точні методи розрахунків через їх багатоваріативність неможливо ефективно перекласти на зрозумілу для електроніки мову. Тому паралельно з розвитком комп'ютерної техніки розвивалися й спеціальні методи, що отримали назву чисельних методів. Для інженерних розрахунків найбільше поширення отримав метод скінченних елементів. Він використовується у обчислювальній гідродинаміці, механіці деформування твердого тіла, механіці руйнування, теплообміну, усталостної довговічності, електромагнетизмі. В галузі розробки сільськогосподарської техніки є значні напрацювання для розрахунку конструкцій з позиції міцності, надійності. Практика показує, що використання методу скінченних елементів значно підвищує ефективність як самого процесу проєктування так і результату, що отримується. Але, коли мова йде про процес обробітку ґрунту, проєктувальник стикається з

динамічним руйнуванням ґрунту, для якого характерні значні зміни за короткий проміжок часу у складі середовища, його властивостей. В таких умовах традиційні способи використання методу скінченних елементів дають значну похибку. Тому розробка спеціалізованого алгоритму для використання методу скінченних елементів при розрахунку взаємодії робочих органів сільськогосподарських машин з ґрунтом є актуальною темою.

Мета роботи - розробити ефективний алгоритм моделювання взаємодії робочих органів сільськогосподарських машин з ґрунтом.

Завдання кваліфікаційної роботи:

1. Вибрати опорну базу даних процесу різання ґрунту на основі достовірних результатів дослідження.
2. Розробити імітаційну модель різання ґрунту на основі методу скінченних елементів.
3. Визначити функціональні залежності між характеристиками реального ґрунту і змодельованого ґрунтового середовища.

Об'єкт дослідження: робочі органи сільськогосподарських машин для обробітку ґрунту та процеси руйнування ґрунту, які вони породжують.

Предмет дослідження: модель руйнування ґрунту.

Методи дослідження: аналіз, синтез, дедукція, аналогія, моделювання, ідеалізація, порівняння, факторний аналіз.

Наукова новизна:

- Розроблений метод створення імітаційної моделі процесу руйнування ґрунтового середовища ґрунтообробними робочими органами на базі неньютонівської рідини Бінгама.
- Встановлений зв'язок між властивостями ґрунту і неньютонівською рідиною Бінгама.

Практичне значення одержаних результатів: за допомогою розробленого методу створення імітаційної моделі є можливість розробляти

нові, більш ефективні ґрунтообробні робочі органи, а також прогнозувати результати застосування існуючих машин в конкретних умовах.

Особистий внесок здобувача: розроблена імітаційна модель взаємодії робочого органу з рідиною Бінгама та визначений зв'язок властивостей цієї рідини з властивостями реального ґрунту.

Апробація: участь у III Міжнародній науково-практичній конференції «Аграрно освіта: минуле сучасне майбутнє» 9-10 листопада з доповіддю «Моделювання взаємодії робочих органів сільськогосподарських машин з ґрунтовим середовищем».

Структура і обсяг кваліфікаційної роботи: вступ, 3 розділи основної частини, висновки, список використаних джерел, 31 рисунок, 20 таблиць, 1 додаток. Загальний обсяг сторінок 87.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГРУНТООБРОБІТКУ

1.1 Основні фізико-механічні властивості ґрунту

Ґрунт є складним природним тілом, в якому можна виділити тверду, рідку і газоподібну фази, також до складу ґрунту можна віднести живі організми, що його населяють [1]. Найбільш стійкі властивості має мінеральна частина твердої фази ґрунту, який в основному і визначає загальні фізичні властивості ґрунту. До них відносяться щільність твердої фази, щільність непорушеного природного складання ґрунту і її порозність [2].

Щільність твердої фази ґрунту d – маса сухої речовини ґрунту m в одиниці об'єму твердої фази ґрунту без пір V_s [3]:

$$d = \frac{m}{V_s}$$

Щільність твердої фази залежить від природи і співвідношення мінералів, що складають ґрунт, кількості в ґрунті гумусу і характеризує середню щільність ґрунтових часток.

Розмірність щільності твердої фази ґрунту в системі СІ кг/м^3 або г/см^3 . Її значення на різних ґрунтах і різних глибинах змінюється в межах від 1,2 до 2,3 г/см^3 .

Щільність непорушеного природного складання ґрунту d_v - маса сухої речовини ґрунту m в одиниці її об'єму непорушеного природного складання V [3]:

$$d_v = \frac{m}{V}$$

Ця властивість характеризує взаємне розташування ґрунтових часток і агрегатів. Оскільки в об'єм ґрунту входять все наявні в ній пори, щільність складання ґрунту буде завжди менше щільності твердої фази.

Розмірність щільності складання ґрунту співпадає з розмірністю щільності твердої фази та змінюється в межах 0,5-1,8 г/см^3 . Для більшості

сільськогосподарських культур оптимальна щільність складання ґрунту складає 1-1,2 г/см³ [4].

Порозність або пористість ґрунту V_p – сумарний об'єм усіх пор між частками твердої фази ґрунту. Відношення об'єму пор до загального об'єму ґрунту називається загальною пористістю ґрунту P [3]:

$$P = V_p / V.$$

Величина пористості, розмір і форма пір залежать від гранулометричного складу, структури твердої фази ґрунту, а також від щільності ґрунту. Пористість ґрунту можна виразити через щільність твердої фази ґрунту d і щільність складання ґрунту d_v [3]:

$$P = 1 - d_v / d.$$

На практиці застосовується наступна оцінка пористості ґрунтів [5]:

- відмінна: ґрунт дуже добре розпушений і має пористість на рівні 70%;
- хороша: звичайний культурний стан орного шару 65-55%;
- задовільна: культурний стан ґрунту знаходиться на низькому рівні, 55-50%;
- незадовільна: погано оброблений або переущільнений ґрунт, менше 50%.

Пори, заповнені повітрям, називаються аераційними. У агрономічно цінному ґрунті вони повинні складати не менше 20-25% від загальної пористості [6].

В цілому, властивості ґрунтів можна поділити на фізичні, механічні, хімічні тощо. В нашій роботі ми робимо акцент на механічному впливі сільськогосподарських машин на ґрунт, тобто через взаємодію робочих поверхонь знарядь з ґрунтом виникають сили, які створюють напруження. При перевищенні межі міцності відбувається руйнування та переміщення часток ґрунту. За ці механічні процеси відповідають механічні властивості [7]:

- модуль деформації E , Н/м²;
- коефіцієнт поперечної деформації ν ;
- кут внутрішнього тертя ґрунту α ,
- питоме зчеплення ґрунту c , Па.

В ґрунтах протікають п'ять видів основних природних процесів, які визначаються відповідними режимами: водний, тепловий, аераційний, режим харчування і процеси ерозії. У основі цих процесів лежать стани ґрунту, тобто їх фізичні та механічні властивості. Впливаючи на ґрунт робочими органами машин, ми в змозі цілеспрямовано змінювати ті або інші його властивості для управління природними ґрунтовими процесами, досягаючи при цьому максимально можливих урожаїв вирощуваних сільськогосподарських культур при одночасному поліпшенні родючості ґрунту. Досягнення цієї мети пов'язане з розв'язанням двох завдань. Перше з них – прогностичне, тобто наукове передбачення результатів зміни властивостей ґрунту, як це впливатиме на врожайність сільськогосподарських культур. Друге – це отримання ефективного інструменту для зміни властивостей ґрунту, тобто знаряддя ґрунтообробних машин. Найкоротший шлях до розв'язання цих завдань лежить через моделювання процесів (ґрунтових, технологічних, механічних тощо).

1.2 Огляд сучасних моделей ґрунту при моделюванні роботи ґрунтообробних знарядь

Для дослідження взаємодії робочих органів сільськогосподарських машин із ґрунтом його необхідно формалізувати у вигляді математичної моделі середовища таким чином, щоб властивості цієї моделі найбільш повно відповідали фізичним і механічним властивостям реального ґрунту. Цій проблемі присвячена значна кількість досліджень [8][9][10][11][12][13][14]. А. С. Кушнарєв за основу класифікації взаємодії робочих органів з ґрунтом поклав форму зображення моделі будови ґрунту та типів деформацій, що виникають при взаємодії [15]. За його класифікацією всі моделі ґрунтового середовища можна розділити на три групи:

- тверде тіло, що не деформується;
- суцільне середовище;

– дискретне середовище.

При моделюванні ґрунту, як тверде тіло, що не деформується всі розрахунки ведуться методами теоретичної механіки. При розв’язанні задач взаємодії робочого органу з ґрунтом, з боку робочого органу діючі сили зводяться до рівнодіючої R . Встановлюється точка прикладання та напрямок її дії. При цьому в розрахунковій схемі та її аналітичних реалізаціях відсутня можливість деформації. При використанні цієї моделі передбачається розвиток тріщини в ґрунті по лінії дії рівнодійної, при цьому інколи рівнодіючу переносять до носка клину.

Використання моделі абсолютно твердого тіла для розв’язання задач впливу ґрунтообробних органів на ґрунт виключається можливістю врахувати її механічні властивості та здатність змінювати об’ємну масу в процесі обробітку.

Мабуть найпоширенішою моделлю ґрунту є «суцільне середовище». Під цим поняттям мається на увазі модель такого матеріального тіла (твердого, рідкого або газоподібного), які, не зважаючи на те, що складаються з окремих часток, заповнюють частину простору безперервним (суцільним) образом. Безперервність будови такого ідеалізованого тіла зберігається в процесі деформування. Гіпотеза про безперервність (континуум) матеріального тіла дозволяє розділити його на елементарні об’єми та використовувати апарат диференційного обчислення при вивченні пружньо-деформованого стану.

Однак ґрунт за своєю природою – це дискретне середовище, оскільки вона складається зі структури окремих часток, між якими є вільний простір, що заповнений водою або повітрям [16]. Подібну модель описав І. І. Кандауров [17]. В ній статистично описуються взаємодії окремих часток з врахуванням фізичного виду в’язів між ними. Це дозволяє перейти до математичного апарату диференційного числення. Тобто, повертаємося до моделі суцільного середовища зі статистичним врахуванням дискретності.

У кожній з наведених моделей є свої переваги:

- абсолютно тверде тіло – простота методів, що використовуються для розрахунків, можливість дослідження тріщиноутворення;
- суцільне середовище – можливість дослідження деформації ґрунту, використання спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання.
- сипуче середовище – описує вплив структури ґрунту на процеси, що в ньому відбуваються.

Недоліки моделей:

- абсолютно тверде тіло – ґрунт не деформується, його щільність не змінюється;
- суцільне середовище – не враховується залежності властивостей ґрунту від його структури;
- сипуче середовище – складність розрахунків та подальше переведення до суцільного середовища з його недоліками.

За кожним з цих напрямів є цікаві дослідження, що відрізняються своїм підходом до вирішення технологічної проблеми взаємодії робочого органу обробітку ґрунту з ґрунтовим середовищем. Так, І. А. Шевченко окрім отриманого рівняння руху матеріальної частинки ґрунту по поверхні робочого органу обробки ґрунту використав теорію Мора-Кулона, яка доповнює теорію міцності ґрунту [18]. За результатами експериментальних досліджень з оптимізації агрофізичних властивостей орного горизонту І. А. Шевченко розглядав диференційовану структуру ґрунту. М. В. Бакум та Д. А. Ящук розглянули питання ескізної геометрії визначення висоти гребнів над дном борозни під час обробітку ґрунту [19]. В. П. Ковбаса навів фізичні рівняння зв'язку між напруженнями та швидкостями деформації для ґрунтового середовища при дії на нього ґрунтообробного робочого органу [Ковбаса]. Кожна з представлених моделей використовується окремо одна від одної, що

призводить лише до однобічного розгляду науково-технічної складності моделювання взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин із ґрунтом.

Зі стрімким розвитком інформаційних технологій окремий інтерес викликає можливість реалізації моделей за допомогою чисельних методів спираючись на програмні платформи. Овчаренко О. А. побудував модель взаємодії об'ємного розпушувача з пружньо-пластичним середовищем (рис. 1.1, а), описаним моделлю Друкера-Прагера в програмному комплексі Ansys, який реалізує метод скінченних елементів [12]. Розрахунок здійснювався ітераційним методом Ньютона-Рафсона. За допомогою чисельного методу тут вдалося відійти від точного розв'язання диференціальних рівнянь, ввести геометричну модель робочого органу складної форми та отримати результат як по діючим силам, так і по деформаціям пласта. Недоліком цього підходу стала неможливість перебудову сітки скінченних елементів при проході стойки в ґрунті. В процесі роботи, різальні кромки 1 (рис. 1.1, б) рухаються в моноліті ґрунту, тому для коректного використання методу скінченних елементів при моделюванні процесу розпушування, необхідно спочатку задати щілину 2, по якій проходитиме робоча кромка 1, а робочий орган в цілому взаємодіє з пластом 3.

Ще один недолік описуваного підходу до моделювання – погана збіжність при значних відносних деформаціях. Тобто він підходить для моделювання чизельних робочих органів, плоскорізів, культиваторів, а ось для моделювання відвальних плугів він не підходить. Також тут відсутня можливість досліджень перемішування пластів і переміщення між ними окремих часток, хоча, уявлення про рух часток в ґрунті від механізованої дії може істотно вплинути на прогноз родючості ґрунту, отримуваний урожай і проектування самого робочого органу.

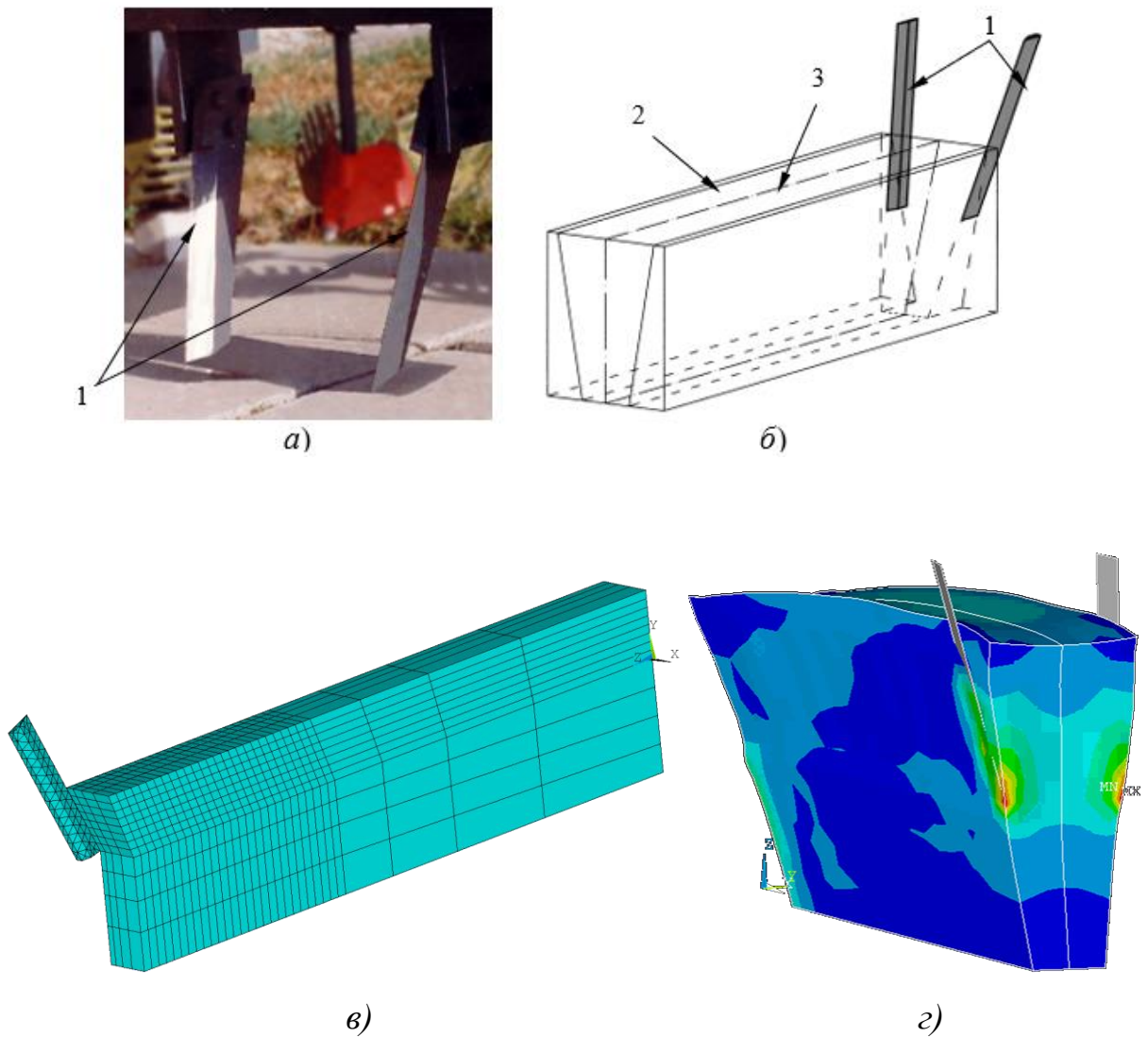


Рисунок 1.1 – Моделювання робочого органу для об'ємного розпушування ґрунту: а) реальний робочий орган; б) геометрична модель робочого органу, підготовлена для розбиття на скінченні елементи; в) - скінченно-елементна модель; г) - розподіл еквівалентного напруження в перерізі пласта при проходженні стійок; 1 - різальна кромка; 2 - щілина, що заздалегідь задається; 3 - оброблюваний пласт.

Ще один чисельний метод, що можна задіяти для моделювання ґрунту – це метод дискретних елементів (DEM), в якому з певними припущеннями ґрунт розглядається, як дискретне середовище [14]. DEM є привабливим інструментом для проведення моделювання на основі фізики та симуляції взаємодії сільськогосподарського ґрунту та інструменту. Він забезпечує

структуру для моделювання великих переміщень матеріалу, потоку матеріалу та руйнування ґрунту, які є важливими характеристиками роботи знарядь для обробітку ґрунту [21] [22].

При моделюванні операцій з обробітку ґрунту за допомогою DEM агрегати часто розглядаються як статичні сфери різного розміру [23] або як збірки сфер, які утворюють статичні форми, схожі на агрегати [24]. Однак ґрунти складаються з природних агрегатів і грудок різного розміру та форми зі здатністю дробитися на менші частини, такий підхід запропоновано Фредерік Ф. Фолдагером [14] (рис. 1.2).

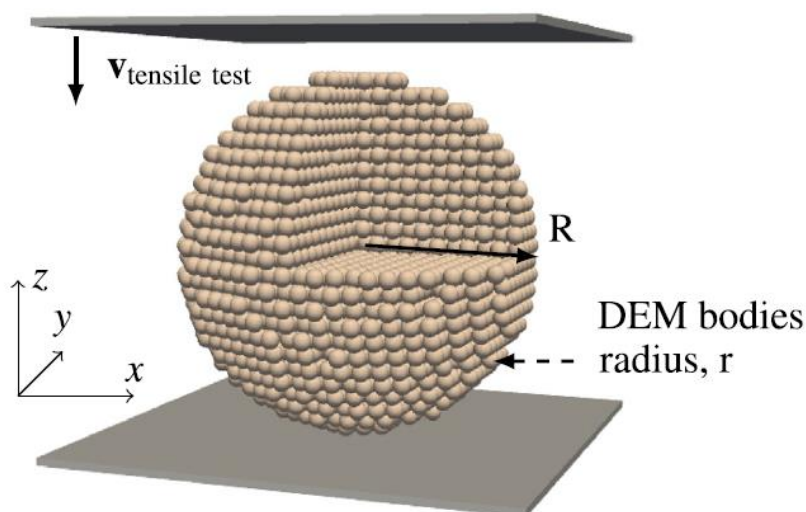


Рисунок 1.2 – 3D візуалізація використання методу дискретних елементів при моделюванні ґрунтового середовища.

Дж. Б. Барр, Шанг Дж. в своїх роботах акцентували увагу на тому, що в проектуванні та оптимізації сільськогосподарської техніки метод дискретних елементів відіграє важливу роль завдяки своїй здатності прискорити процес проектування та виробництва завдяки зменшенню повторного створення прототипів, випробувань та оцінки в умови експерименту [25] [26]. Він використовувався в галузі динаміки ґрунту при проектуванні та оптимізації робочих органів ґрунтообробітку. Цей чисельний метод може фіксувати динамічну та об'ємну поведінку ґрунтів і взаємодію ґрунту з робочим органом [27] [28]. Один із варіантів програмної реалізації методу дискретних елементів

– використання програми Simcenter STAR-CCM+. Так, в цьому додатку Алієв Ельчин Бахтіяр та ін. виконали моделювання роботи модулю для передпосівного обробітку ґрунту [29].

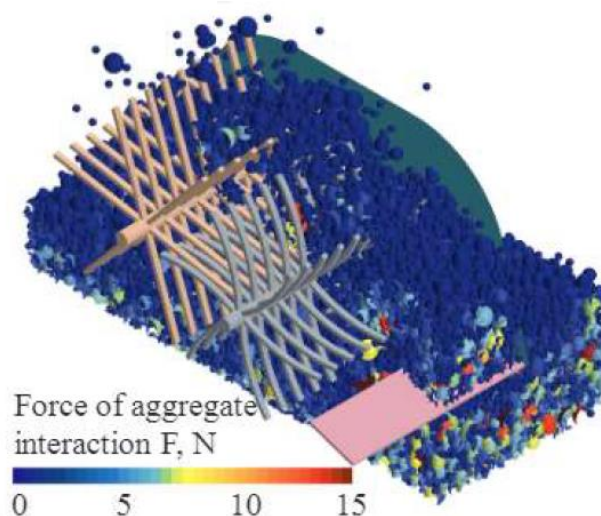


Рисунок 1.3 – Моделювання модулю для передпосівного обробітку ґрунту в програмі Simcenter STAR-CCM+.

А. Ібрагімі та ін. [31] ілюструє використання FEM для моделювання взаємодії відвального плуга. Для моделювання поведінки піщаного ґрунтового матеріалу використовувалася пружнопластична модель Друкера-Прагера. Відвал розглядався як дискретне тверде тіло з орієнтиром у верхній частині, в якому розраховувалися три ортогональні складові сил (вертикальна, бічна та осадова). У цьому дослідженні досліджувався вплив глибини різання леза, робочої швидкості, кута різання та кута підйому на зусилля обробітку ґрунту. Було зроблено висновок, що FEM можна використовувати для розуміння впливу конструкції відвала та умов експлуатації на сили обробітку ґрунту, потреби в енергії та якість перекидання ґрунту.

Т. Окаясу та ін. [32] змодельовали взаємодію ґрунтообробного робочого органу за допомогою тривимірної геометрії плуга та шару ґрунту, змодельованого частинками DEM. Завдяки введенню елемента зв'язку між частинками, адгезія ґрунту була організована так, щоб імітувати справжній зв'язний ґрунт. Профілі різання ґрунту досліджували в контексті варіацій

властивостей ґрунту та норм обробітку. Наступні сили реакції плуга були оцінені за результатами моделювання. Змодельовані сили реакції якісно узгоджувалися з експериментальними даними.

Т. Ху та ін. [27] розробили модель аналізу рослин точного висіву на основі DEM у поєднанні з методом динаміки багатьох часток (MBD). Було змодельовано та проаналізовано процес покриття та ущільнення ґрунту. Порівняння між результатами експерименту та результатами моделювання показало, що тенденція була подібною, а обидва результати були близькими.

М. Usgul та ін. [28] змодельовали взаємодію між ґрунтом і однобічним модифікованим дисковим плугом за допомогою DEM. Оскільки дисковий плуг є інструментом з пасивним приводом, швидкість обертання дискового плуга була змодельована за допомогою комбінації DEM-MBD.

Динаміку ґрунтових часток з певним наближенням можна представити, як рідину. В своїх дослідженнях Кобец Анатолія Степановича та ін. виконали моделювання лапи культиватора, диска, чизельної стойки, оборотного плуга та катка за допомогою методу дискретних елементів та методу об'єму рідини (VOF) [13], що дозволило порівняти адекватність цих моделей (рис. 1.4).

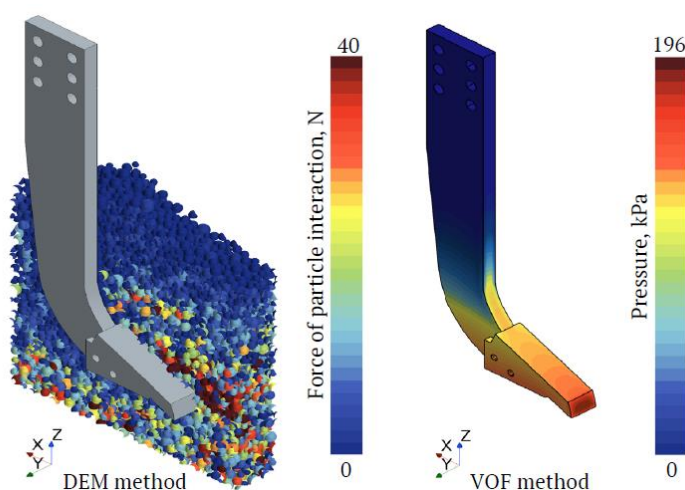


Рисунок 1.4 – Порівняння результатів моделювання чизельної стойки DEF методом та VOF методом.

Це дослідження показало, що для підвищення точності моделі ґрунту різних типів необхідно провести більше лабораторних досліджень для

визначення їх властивостей та порівняння з параметрами, зазначеними в Simcenter STAR-CCM+. Моделювання взаємодії робочих органів обробітку з ґрунтом дозволяє візуалізувати її, визначити швидкісні розподіли частинок ґрунту при моделюванні DEM та потік ґрунту відносно робочого органу при моделюванні VOF. Крім того, можна визначити розподіл сили взаємодії частинок ґрунту методом DEM, тиск на поверхню робочого органу методом VOF, висоту утворених гребнів і глибину борозен та їх розташування в просторі. Загалом, як DEM, так і VOF методи можуть бути корисними для моделювання взаємодії робочого органу з ґрунтом у Simcenter STAR-CCM+, залежно від конкретної ситуації та задачі, що вирішується. VOF може бути точним для моделювання великомасштабних процесів, але не завжди точно описує маломасштабний рух. З іншого боку, метод DEM може бути точним для моделювання дискретних частинок ґрунту, але не завжди точно описує великомасштабні процеси. Вони доповнюють один одного і створюють загальну картину фізики взаємодії ґрунтообробного робочого органу з ґрунтом.

А. А. Тагар та ін. [30] використовували метод скінченних елементів (FEM) для моделювання моделей руйнування ґрунту, пов'язаних з межами консистенції та точки прилипання ґрунту, порівнюючи результати моделювання з моделями руйнування ґрунту, які спостерігалися в ґрунтовому каналі та в полі. Результати свідчать про те, що FEM є корисним інструментом для створення моделей руйнування ґрунту, але імітаційні моделі краще корелювали з ґрунтовым каналом, ніж з результатами польових випробувань.

В останній час швидко розвиваються технології з використанням нейромереж та штучного інтелекту. В тому числі, на їх основі можна побудувати модель механізованого обробітку ґрунту. Головною метою дослідження Al-Dosari NMN та ін. [33] стало застосування методів штучної нейронної мережі (ШНМ) і множинної лінійної регресії (МЛР) для моделювання характеристик роботи агрегату механізації (тракторно-

чизельного плуга) під час оранки як на різних типах ґрунту, так і при різних режимах його обробітку. В якості вихідних параметрів контролювалася тягова сила, витрати палива, загальної енергоефективності, норми зораного об'єму ґрунту та коефіцієнт навантаження. Розроблена модель ШНМ мала 2 вузли для вхідного шару, 15 нейронів для першого прихованого шару та 7 вузлів для вихідного шару, тобто топологія 2–15–7. Результати показали високу прогностичну ефективність такої моделі. Але з іншого боку ми розуміємо, що подібні алгоритми залежать від якості навчання нейромережі. Вона добре працюватиме на широко вживаних технологіях, а от використання принципово нових машин даватиме значні похибки.

Таким чином, при проектуванні нових конструкцій ґрунтообробних робочих органів агротехніки не можуть досліджувати їх взаємодію з ґрунтом через складні аналітичні фізико-математичні моделі, розроблені згаданими відомими вченими та дослідниками. Для спрощення розрахунків цієї взаємодії в рамках сільськогосподарського машинобудування необхідно узагальнити досягнення українських і зарубіжних агрономів в єдиному програмному забезпеченні. Сьогодні вже практикується використання чисельного моделювання взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин із ґрунтом у спеціалізованих програмних комплексах.

1.3 Вибір достовірних результатів досліджень взаємодії елементарного робочого органу з реальним ґрунтом

У назві розділу закладені основні критерії для вибору відповідних досліджень, це:

- достовірність;
- простота робочого органу;
- дослідження мають бути проведені на реальному ґрунті.

1.3.1. Достовірність досліджень взаємодії робочих органів з ґрунтом

Як основний критерій достовірності скористаємося авторитетністю автора.

Передусім, тут слід зазначити праці основоположника землеробської механіки, академіка В. П. Горячкіна [8]. У зв'язку з появою тракторів і їх широким впровадженням постало питання про раціональне використання їх тягової сили. Їм накопичена величезна кількість власних дослідних даних по опору робочих органів під час різання ґрунтів. Крім того він зібрав дані і вчених інших країн, що привело до необхідності їх приведення до єдиної системи одиниць виміру опору. Їм був встановлений наступний взаємозв'язок: $12 \text{ англ. фунт/дм}^2 = 1 \text{ пуд/верш}^2 = 0,8 \text{ кгс/см}^2$.

Така кількість експериментального матеріалу і революційні на той момент ідеї дозволили отримати знамениту формулу В. П. Горячкіна для визначення загального опору плуга:

$$P = iG + fG + kF + \varepsilon \rho F v^2$$

де G - вага машини;

f - коефіцієнт переміщенню (перекочуванню) машини;

k - питомий опір різанню ґрунту;

F - площа поперечного перерізу деформованої ділянки;

$\varepsilon \rho F v^2$ – зусилля, що витрачається на відкидання ґрунту;

ε – коефіцієнт пропорційності швидкості;

ρ – щільність ґрунту.

Н. Г. Домбровський проводив дослідження з одноковшовими екскаваторами. Їм був даний первинний матеріал для проектування екскаваторів і нормування екскаваторних робіт. Досліди проводилися з одноковшовим екскаватором (об'єм ковша $0,35 \text{ м}^3$), обладнаним механічною лопатою, драглайном і стругом, а також на моделях драглайну і струга, що вміщують $0,015$ і $0,012 \text{ м}^3$.

Для визначення впливу об'єму ковшів на зусилля копання при експериментуванні замість ковшів різних розмірів ставилися досліди з одним і тим же ковшом екскаватора, товщина різальних кромek якого змінювалися від 22 до 55 мм.

У дослідах визначалися за допомогою динамометра сумарні зусилля копання P_k залежно від впливаючих чинників. А також питомі опори копанню

$$K' = P_k / F$$

де F - площа стружки, що знімається.

При пізніших дослідах в польових умовах з екскаваторами і скреперами були набуті значень K' (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 - питомий опір копанню різних ґрунтів

Ґрунт	Питомий опір (Н/см ²)		
	Лопата	Струг і драглайн	Скрепер
Пісок, супісок, суглинок легкий (вологі)	1,6...7,0	2,8...12	2,5...10,5
Суглинок, гравій дрібний і середній, глина легка, волога або розпушена	6,0...13,0	10...19	9,5...18
Глина середня або важка розпушена, суглинок щільний	11,5...19,5	16...26	17,5...28,6
Глина важка	20...30	26...40	32...49,5

П. М. Василенко здійснив фундаментальні в області землеробської механіки теоретичні і експериментальні дослідження руху матеріальних частинок по фрикційних поверхнях сільськогосподарських машин, в результаті якого був розроблений метод розрахунку фрикційних поверхонь

грунтообробних машин. Найважливішими для створення нових машин стали дослідження, які встановили впливи елементів робочих органів на деформацію ґрунту. Це дозволило затверджувати про механічні зміни характеристик ґрунту, які при цьому відбуваються. Встановлений характер, величина і швидкість переміщення ґрунту робочими органами, які мають різні геометричні параметри.

А. Н. Зеленіним проведений величезний об'єм експериментальних і теоретичних досліджень з щонайширшим спектром землерийних машин [8]. Проведений аналіз впливу характеристик ґрунту на процес взаємодії з ним різних видів робочих органів. Досліджувалися як в цілому знаряддя, так і їх окремі складові – вертикальні стойки з різними геометричними параметрами, прості і складніші контури.

1.3.2. Види робочих органів

На базі усіх існуючих робочих органів проведені експериментальні дослідження. Проте, щоб вдале провести паралель між взаємодією реального знаряддя з ґрунтом і його моделлю, необхідно звести до мінімуму кількість чинників, що впливають на цей процес. Передусім, необхідно звести до мінімуму кількість геометричних чинників. Таким чином, слід відкинути такі знаряддя, як ківш екскаватора або лопата бульдозера. Оскільки вони мають складну форму та включають декілька елементарних тіл сукупність роботи яких можуть вплинути на чистоту результату.

Найцікавішими є експерименти з двограним клином, оскільки з одного боку – це самий елементарний робочий орган, а з іншого боку він є базовим елементом для знаряддя будь-хто, навіть найскладнішої форми.

1.3.3. Вибір базових досліджень

Виходячи з вищеписаних вимог, найцікавішими з усіх доступних досліджень є експериментальні дані проф. А. Н. Зеленина. Їх унікальність

полягає в диференційованому визначенні значень окремих компонентів, що становлять сумарну силу різання ґрунту. Таким чином, не дивлячись на те, що неможливо провести реальний експеримент тільки з двограним клином (це пов'язано з необхідністю наявності несучої стойки), знаючи складові загального тягового опору, можна вичленувати опір самого клину. Для цього скористаємося результатами дослідів впливу довжини горизонтальної різальної кромки на зусилля різання і віднімемо з них результати дослідів з двома вертикальними, паралельно розташованими профілями.

Досліди проводилися на супіску вологістю $\omega = 9,5\%$ і кількістю ударів щільноміра $C = 8$. Два випробовувані листи розміром 7×200 мм розсувалися послідовно на відстані $a = 0 \dots 1000$ мм. Глибина різання h змінювалася від 0 до 420 мм.

Методика проведення дослідів була наступна. Величина a послідовно збільшувалася від 0 до 150 см при постійному значенні h . Потім приступали до наступної серії дослідів при іншій глибині різання. Досліди велися при куту нахилу стоек $\alpha = 90^\circ$. Передня різальна грань товщиною $s = 7$ мм не була загострена, тобто кут заточування $\beta = 180^\circ$. В результаті дослідів отримані криві, що виражають залежність тягового зусилля від відстані між листами при різній глибині різання.

Знаючи закони взаємного впливу двох вертикальних профілів, що розсуються на різні відстані a , можна знайти вплив на силу різання ширини і висоти двогранного клину.

Різальному робочому органу з бічними і горизонтальними профілями надавалися форми різального периметра (рис. 1.5). Методика проведення дослідів така ж, як і в попередньому дослідженні. Параметри горизонтального клину наступні: нижній кут $\gamma = 7^\circ$, кут різання $\alpha = 35^\circ$, товщина різальної пластини $s = 1$ см.

Таблиця 1.2. – Залежність сили різання двограним клином від його геометричних параметрів

Довжина l , м	Глибина різання h , м	Площа перерізу A , м ²	Опір клину P , кН
0,4	0,27	0,108	2,04
0,5		0,135	4,08
0,6		0,162	6,12
0,7		0,189	8,16
0,4	0,20	0,08	1,02
0,5		0,1	2,81
0,6		0,12	4,08
0,7		0,14	6,12
0,5	0,15	0,076	1,28
0,6		0,09	2,55
0,7		0,11	3,83

Таким чином, є можливість використовувати експериментальні дані, що включають три змінювані чинники довжину, глибину і площу. При цьому площа є залежним чинником. Виключимо його, привівши усі результати до єдиної площі $A=0,1 \text{ м}^2$ (таблиця 1.3).

З таблиці 1.3 видно, що для зрізання стружки однакової площі поперечного перерізу зусилля витрачається завжди більше у випадку більшої глибини ніж більшої довжини. Графічно це представлено на рис. 1.7. Слід зазначити також, що питомий опір знаходиться у функціональній залежності від співвідношення між довжиною і глибиною стружки. Це свідчить про неточність раціональної формули Горячкіна, в якій питомий опір K є величина постійною і залежить тільки від стану ґрунту. Таким чином, модель, що розробляється, повинна враховувати описану властивість питомого опору.

Таблиця 1.3 – Вплив сили різання клином від його довжини і глибини, при приведенні до єдиної площі $A = 0,1 \text{ м}^2$

Довжина l , м	Глибина h , м	Сила різання клином P , кН	Питомий опір, кН/м ²
0,67	0,15	3,45	34,5
0,50	0,20	2,81	28,1
0,37	0,27	1,89	18,9

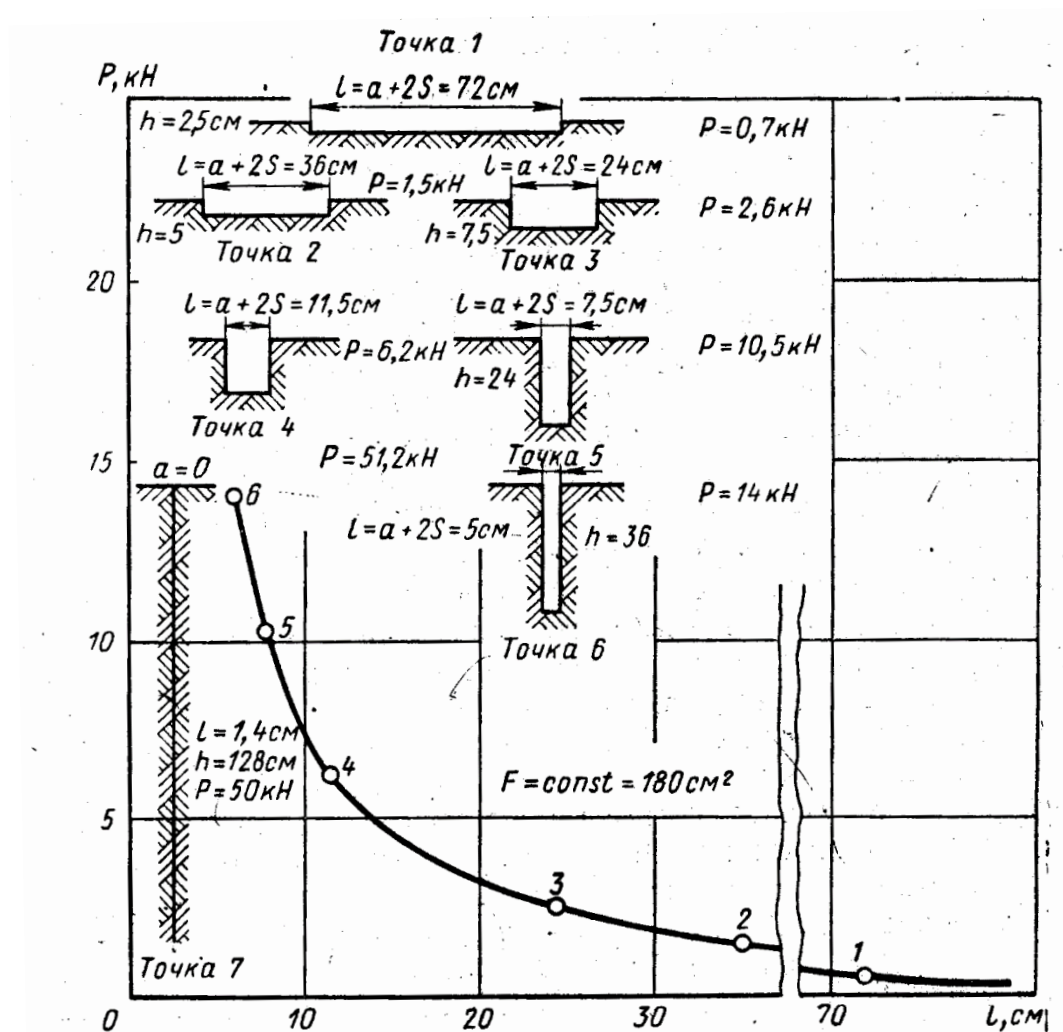


Рисунок 1.7 – Залежність зусилля різання від довжини горизонтальної різальної кромки при знятті стружки з постійним перерізом $A = 180 \text{ см}^2$

Далі необхідно перейти від характеристики ґрунту – вологості і кількості ударів щільноміра C до механічних характеристик – кута внутрішнього тертя

ϕ і коефіцієнта зчеплення C_0 . Для цього ще раз скористаємося дослідженнями А. Н. Зеленина [8].

Використовуючи рис. 1.8, за значенням ω і C знаходимо показник консистенції зв'язних ґрунтів B_k , який визначає міру рухливості часток ґрунту при різній вологості в результаті механічної дії на ґрунт. Для $\omega = 9,5\%$ і $C = 8$ отримаємо $B_k = 0,4$.

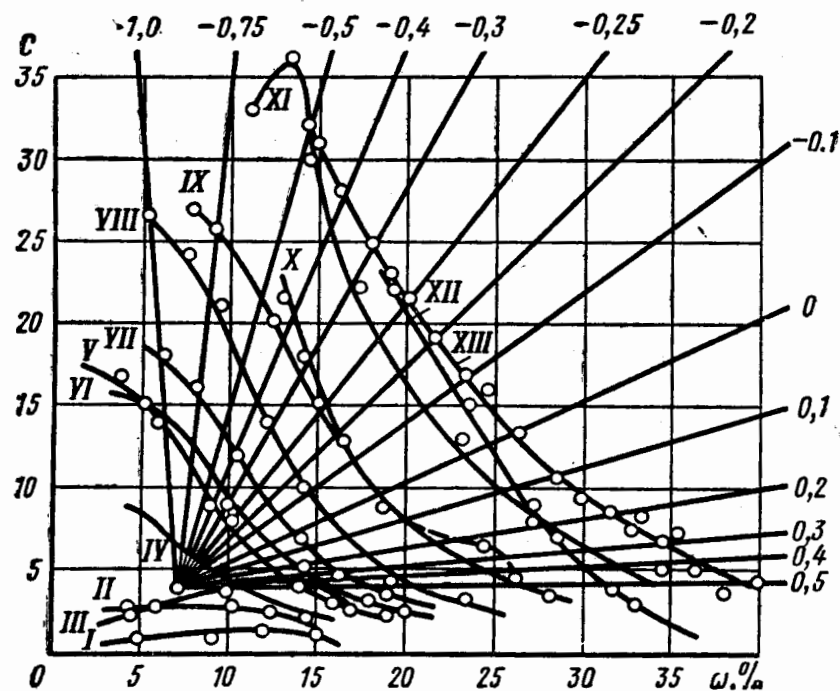


Рисунок 1.8 – Номограма взаємозв'язку числа ударів C з вологістю ω і показником консистенції для зв'язних ґрунтів B_k

Враховуючи показник B_k і кількість ударів щільноміра C , по рис. 1.9 знайдемо коефіцієнт зчеплення $C_0 = 8$ кПа.

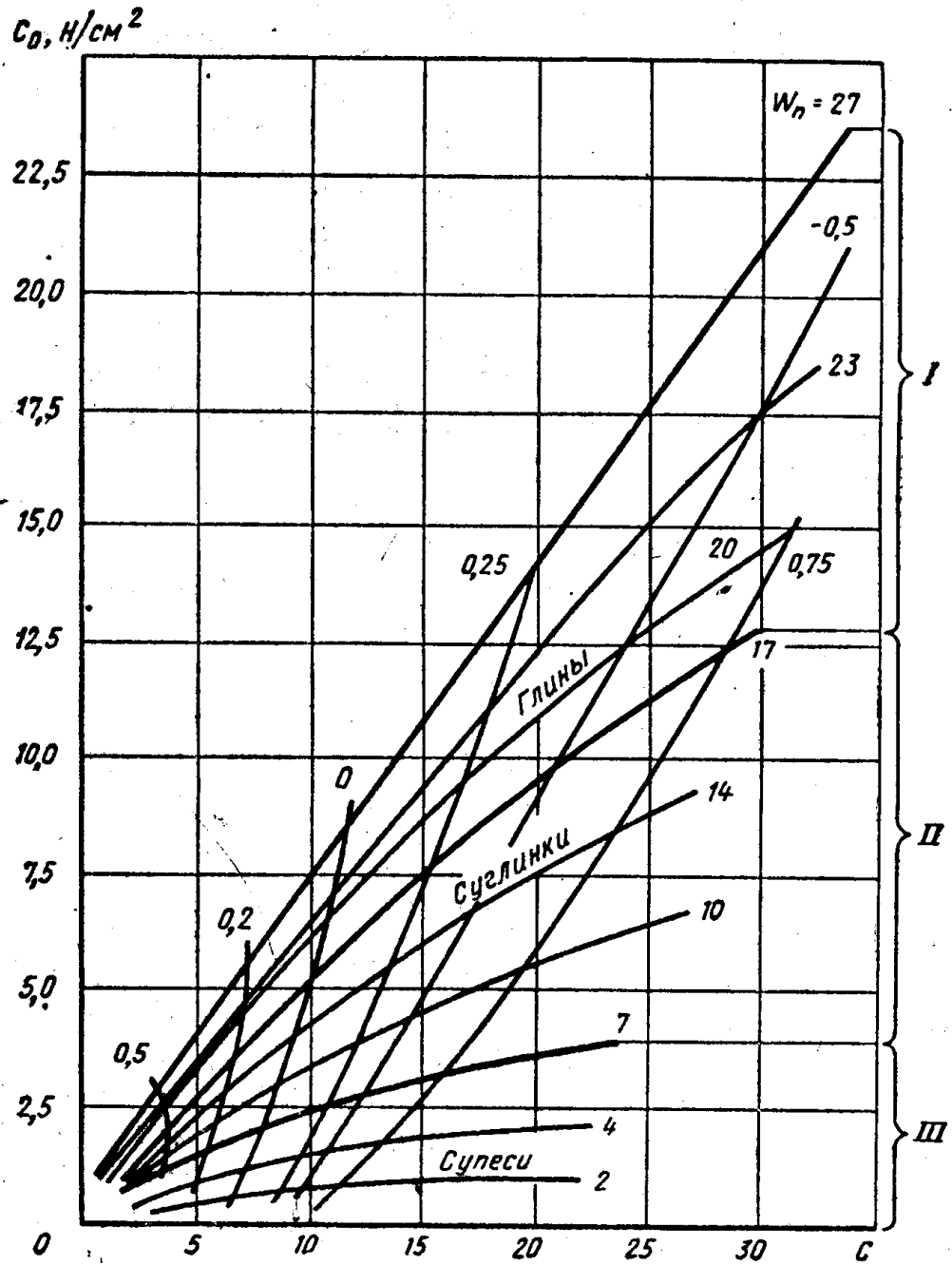


Рисунок 1.9 – Номограма залежності між C_0 і C , що враховує значення B_k і ω_n (по А. Н. Зеленину і В. Б. Горовицу): I - глини; II - суглинки; III - супісок

Після цього по рис. 1.10, з урахуванням кількості ударів щільноміра $C = 9$ і показника $B_k = 0,4$ знаходимо $\varphi = 38,5^\circ$.

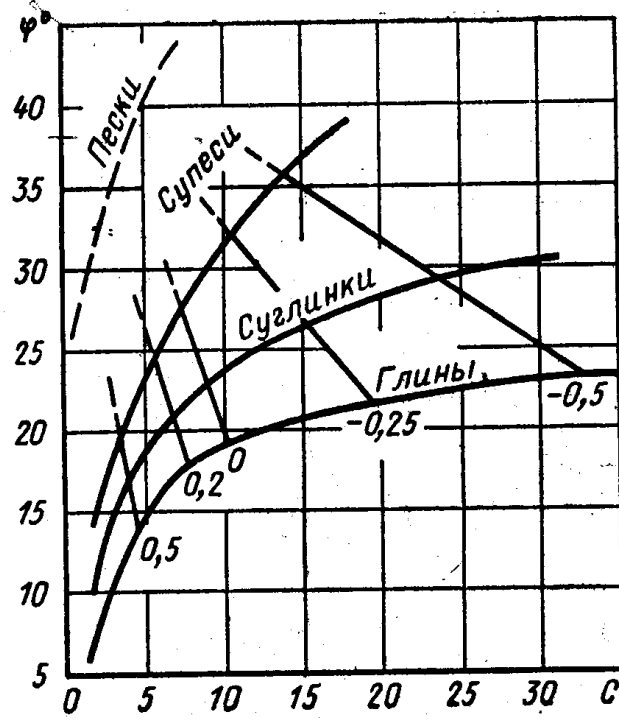


Рисунок 1.10 – Номограма залежності між φ і C , що враховує показник B_k
(по А. Н. Зеленину і В. Б. Горовицу)

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ, НА ОСНОВІ НЕНЬЮТОНІВСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА БІНГАМА

2.1 Постановка завдання

Розрахунок будь-яких параметрів машин для земляних робіт можна здійснити на базі моделі, що описує процес роботи робочих органів цих машин. Розглянемо процес її створення. Для отримання математичної моделі будь-якого процесу слід відокремити елементарний об'єм та розглянути його стан та вплив зовнішнього середовища. Таким чином складаємо одно або систему диференціальних рівнянь. Рішаючи задачу Коши отримуємо математичну залежність, яка описуватиме процес, що моделюється. Нажаль точне рішення вдається отримати лише для деяких досить простих задач. Описати складні процеси в строгій математичній залежності майже неможливо, також неможливо отримати якусь універсальну формулу, для використання її в практиці проектування машин. В той же час розвиток електронної обчислювальної техніки розкриває нові путі вирішення практичних задач. Для комфортного рішення більшості диференціальних рівнянь використовується метод скінченних елементів. Його реалізація закладена у велику кількість програмних комплексів. Наші дослідження побудовані на одній з найпотужніших систем в світі – ANSYS (його безкоштовній студентській версії).

Процес різання ґрунту моделюється за допомогою методу скінченних елементів, тому необхідно пройти 5 етапів створення моделі:

- 1) завдання матеріалу;
- 2) побудова геометричної моделі;
- 3) побудова сітки скінченних елементів;
- 4) завдання граничних умов;
- 5) розрахунок;
- 6) постпроцесорна обробка результатів.

Розглянемо кожен з цих етапів окремо.

2.2 Завдання матеріалу ґрунтового середовища

При моделюванні ґрунту суцільним середовищем, перше що приходить в голову - це використання моделей твердих станів. Найбільш поширеною при цьому являється пружно-пластична модель Кулона-Мору (рис. 2.3), для одновісного розтягування-стискування її рівняння має вигляд:

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2.1)$$

де C - коефіцієнт зчеплення;
 φ - кут внутрішнього тертя.

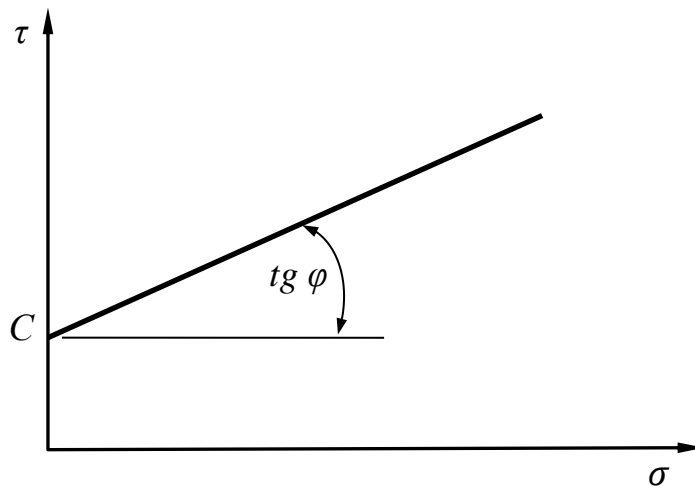


Рисунок 2.1 – Ґрунтове середовище Кулона-Мору

Ця модель є однією з найбільш пріоритетних, оскільки описує поведінку крихких матеріалів, до яких у свою чергу відноситься і ґрунт. Будучи моделлю суцільного середовища, її розрахунок можна здійснювати за допомогою методу скінченних елементів. Оскільки вона описує поведінку елементарних об'ємів, її можна застосувати для досліджень роботи будь-якого робочого органу, будь-якої форми і принципу роботи.

Проте разом з цим вона має ряд серйозних недоліків. Передусім до них слід віднести статичність моделі. Звичайно, швидкість руйнування крихких матеріалів слабо впливає на зусилля та характер руйнування. Але у момент руйнування, пласт перетворюється на сукупність ґрунтових часток, що

переміщуються на значні відстані, виникають інерційні сили, які можуть внести значні зміни до опору ґрунтообробного знаряддя.

Інший недолік пов'язаний з використанням в розрахунках методу скінченних елементів. Різальні кромки, стойки робочих органів, переміщаючись в ґрунті створюють нові площини. Їх утворення в первинному моноліті пласта веде до перестроювання звичайно-елементної сітки, що у поєднанні з нелінійністю процесу значно ускладнює завдання. Тому для спрощення необхідно спочатку «прорізати» щілини для проходження робочого органу. Такий підхід дає деяку неточність результатів.

Наступний недолік описуваного підходу до моделювання - погана збіжність при значних відносних деформаціях.

Дуже важливий недолік, який обов'язково необхідно згадати - це повна неможливість досліджень перемішування пластів і переміщення між ними окремих часток. Цей процес досі залишається маловивченим, оскільки погано піддається моделюванню.

Для зручності зведемо разом усі відмічені переваги і недоліки середовища Кулона-Мору при моделюванні процесів різання ґрунту (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 - Переваги і недоліки середовища Кулона-Мору

	Переваги	Недоліки
Середовищ а Кулона- Мору	Досить точно описує процеси різання ґрунту Є можливість при моделюванні використовувати метод скінченних елементів	Статичність
Методу скінченних елементів при використанні середовища Кулона-Мору	Дозволяє розглядати широкий діапазон форм і типів робочих органів Дає представлення щодо зміни властивостей ґрунту після його руйнування робочим органом	Необхідність заздалегідь створювати щілину для проходу різальних кромки робочих органів Неможливість використання для процесів зі значними деформаціями Не дає уявлення про переміщення пластів і рух часток між пластами.

Таким чином, виникає необхідність при моделюванні процесів різання ґрунту використовувати середовище, яке за своїми властивостями схоже з середовищем Кулона-Мора, є динамічним, і не має приведених недоліків при реалізації методу скінченних елементів. Як таке середовище ми пропонуємо використовувати неньютонівську (аномальну) рідину Бінгама (рис. 2.2). Вона описується рівнянням:

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dn} \quad (2.2)$$

де τ_0 – напруження зсуву;

μ - коефіцієнт динамічної в'язкості;

dv/dn - градієнт швидкості потоку по нормалі до напрямку його руху.

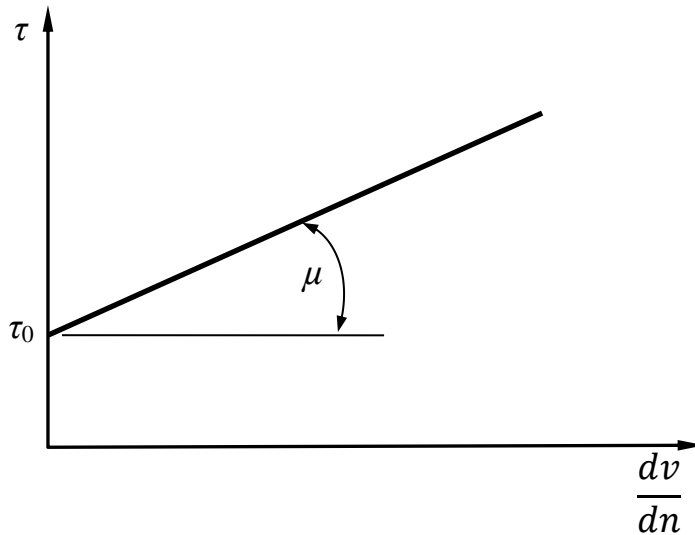


Рисунок 2.2 – Крива реології неньютонівської рідини Бінгама

Неньютонівська рідина Бінгама не тече до тих пір, поки прикладена напруга зрушення не досягне певного значення (часто званого граничною напругою зрушення або межею плинності). Бінгам встановив, що пластичну течію мають суспензії, в яких частки, стикаючись один з одним, утворюють внутрішній каркас. Течія такої системи виникає тільки після руйнування її структури (каркаса), що обумовлює (забезпечує) рухливість часток один відносно одного. В'язкість аномальних рідин (так звана структурна в'язкість)

при заданій температурі і тиску непостійна і змінюється залежно від градієнта швидкості du/dy по мірі руйнування структури рідини [52].

Усе вищесказане можна віднести до ґрунту. Оскільки ґрунт має каркас, що складається із сполучених між собою ґрунтових елементів. Його деформація починається тільки після того, як дотична напруга перевищить силу зчеплення C (таблиця 2.2). Очевидно, що по мірі руйнування каркаса властивості ґрунту міняються.

Таблиця 2.2 – Гідромеханічна аналогія між ґрунтовим середовищем Кулона-Мору і рідким середовищем Бінгама

Пружно-пластичне середовище Кулона-Мору $\tau = C + \sigma \cdot tg\varphi$	Неньютонівська рідина Бінгама $\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dn}$
C - коефіцієнт зчеплення	τ_0 – напруження зсуву
$\sigma \cdot tg\varphi$ - сила тертя між шарами ґрунту	$\mu \frac{dv}{dn}$ – сила тертя між частками рідини
$tg\varphi$ – коефіцієнт внутрішнього тертя, характеристика ґрунту, що визначає силу тертя	μ - коефіцієнт динамічної в'язкості, характеристика рідини, що визначає силу тертя між частками рідини

Ідея використання законів рідкого середовища для вивчення процесів механізованої обробки ґрунту не нова. Ще раціональна формула Горячкіна показала зв'язок між рідиною і ґрунтом. Проте в ній розглядається робочий орган цілком. Використовуючи моделювання на основі середовища Бінгана, з'являється можливість розглядати процеси на рівні елементарних об'ємів, і тільки потім інтегрувати їх в повний процес руйнування ґрунтового середовища. Такий підхід дозволяє зробити модель універсальною, відповідною для робочого органу будь-якої форми.

При моделюванні ґрунту в'язко-пластичним середовищем Бінгама вирішуються проблеми, які виникали в моделях на основі середовища Кулона-мору. Повністю відпадає необхідність в попередньому завданні траси для різальних кромek. Рідина дозволяє отримувати скільки завгодно великі деформації і переміщення. Не дивлячись на нелінійність завдання, збіжність покращується на порядок, збільшується швидкість розрахунків, розширюються можливості використання такої моделі. Для такої моделі немає обмежень пов'язаних з переміщенням часток тіла. Отже, з'являється можливість досліджувати рух часток при різанні ґрунту різними видами робочих органів.

Основною проблемою завдання матеріалу ґрунту моделлю неньютонівської рідини Бінгама – це змінне значення динамічного коефіцієнта в'язкості (на відміну від звичайної рідини). Він залежить від градієнта швидкості потоку $D = \partial v / \partial n$.

Як показано на рис. 2.2, рідина Бінгама припускає два значення динамічної в'язкості - перше дорівнює нескінченності, а друге – динамічній в'язкості ньютонівської рідини. Таким чином, ми отримуємо ідеальну рідину Бінгама :

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 + \frac{\tau_0}{D} & \text{if } \tau \geq \tau_0; \\ \infty & \text{if } \tau \leq \tau_0. \end{cases} \quad (2.3)$$

Якщо $\tau > \tau_0$, то в потоці можуть бути зони, в яких рідина поводить себе як тверде тіло (жорсткі зони). При зростанні τ ці зони збільшуються, а при досить великому значенні τ блокують течію. Коли існують обидва види руху, то можна говорити про наявність "граничної поверхні". Ця поверхня розділяє дві області з різним рухом матеріалу.

Таким чином, в завданнях про течію в'язко-пластичного середовища характерною особливістю є необхідність знаходити рішення рівнянь в областях з невідомою межею. Ця обставина створює великі труднощі при побудові ефективних методів їх дослідження. Основна складність при

чисельному моделюванні течії в'язкопластичного середовища пов'язана з сингулярністю визначальних співвідношень (2.2) і неможливістю визначити напругу в тих областях, де швидкість деформації дорівнює нулю. Для того, щоб здолати відмічені труднощі, вводяться різні модифікації (регуляризації) моделі бінгамовської рідини. Наприклад, середовище розглядається як нелінійна в'язка рідина (без виникнення граничної поверхні) (рис. 2.3):

$$\tau_{ij} = \eta_{\epsilon}(|D|)D_{ij}, \quad \epsilon \ll 1,$$

де $\eta_{\epsilon}(|D|) \rightarrow \eta(|D|)$ при $\epsilon \rightarrow 0$.

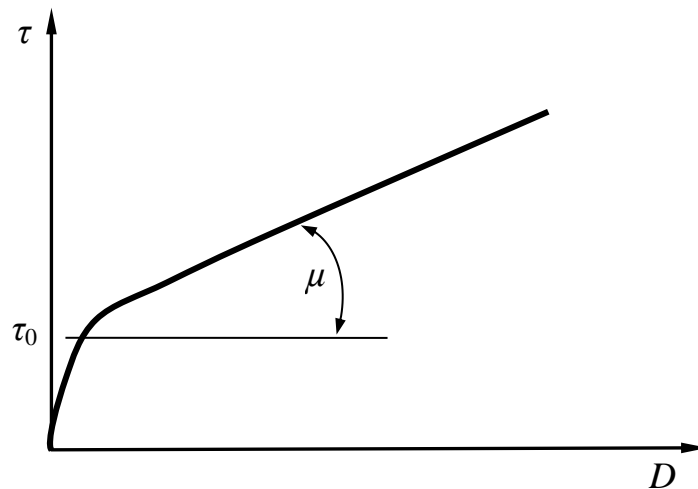


Рисунок 2.3 – Крива реології регуляризованого середовища Бінгама без граничної поверхні

Найбільш популярні моделі:

- Берков'єра-Енгельмана

$$\eta_{\epsilon} = 2\mu + \tau_s \left(\frac{1}{[\epsilon^2 + |D|^2]^{1/2}} \right);$$

- Папаністоса

$$\eta_{\epsilon} = 2\mu + \tau_s \left(\frac{1 - e^{-|D|/\epsilon}}{|D|} \right).$$

Окрім гладких регуляризованих моделей, широко використовується модель з кусочно-постійною в'язкістю ("biviscosity") [60] (рис. 2.4).

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 + \frac{\tau_0}{D} & \text{if } D > \frac{\tau_0}{\mu_r - \mu_0}; \\ \mu_r & \text{if } D \leq \frac{\tau_0}{\mu_r - \mu_0}. \end{cases} \quad (2.4)$$

Поки швидкість деформації D не досягла величини відповідної межі текучості, як коефіцієнт динамічної в'язкості приймається величина, значно завищена в порівнянні з в'язкістю μ_0 , як правило, вона дорівнює $\mu_r = 100\mu_0$.

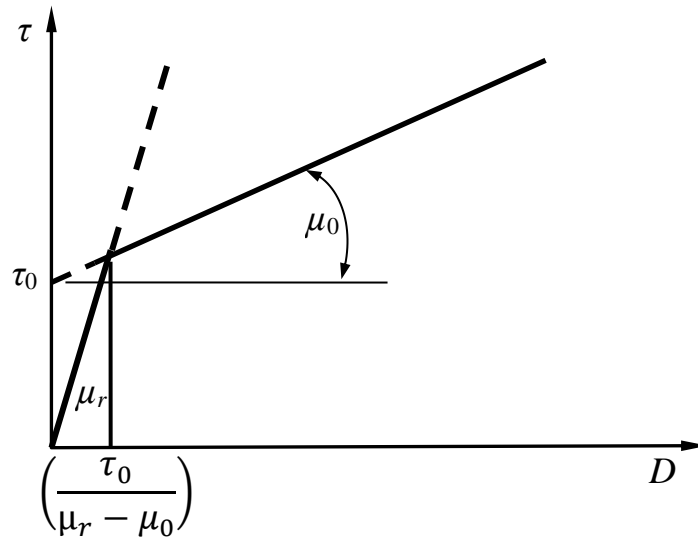


Рисунок 2.4 – Крива реології регуляризованої моделі Бінгама з кусочно-постійною в'язкістю ("biviscosity").

Регуляризовані моделі мають ряд недоліків. Так при $\epsilon \rightarrow 0$ (тобто коли модель наближається до моделі Бінгама) чисельні методи для регуляризованих моделей стають менш ефективними і час обчислень швидко росте. Іншим недоліком регуляризованої моделі є наступне: при значенні напруги τ менш деякого критичного значення в середовищі Бінгама течія в області відсутня. При використанні регуляризованих моделей течія має місце завжди, хоча і з малими швидкостями. У разі нестационарного завдання регуляризована модель може невірно відтворювати поведінку рішення при $t \rightarrow \infty$ [60]. Крім того, для регуляризованих моделей не визначено поняття жорсткої зони, і наявність жорсткої зони вводиться умовою малості деформацій.

Альтернативою регуляризованим моделям може служити варіаційні методи з дискретизацією простору за допомогою методу скінченних елементів. Саме такий підхід і був використаний при розробці моделі. Динамічний коефіцієнт в'язкості задається формулою:

$$\mu = \frac{\tau_0}{D} + \mu_0. \quad (2.5)$$

Таким чином, остаточно ми отримуємо наступні характеристики середовища Бінгама - динамічний опір зрушення (τ_0), коефіцієнт динамічної в'язкості на ділянці ньютонівської течії (μ_0). Крім того, оскільки скачки в'язкості викликають в неявному вирішувачі програмного комплексу Ansys CFX осциляції інших величин, необхідно ввести граничні (допустимі) значення для градієнта швидкості деформації dv/dn . Таким чином, з'являються ще дві величини, що потребують завдання (хоча вони не є характеристиками самого середовища) - D_{\min} і D_{\max} .

2.3 Побудова геометричної моделі

Метод скінченних елементів – це чисельний метод, тому в ньому не можна розв'язувати задачу у загальному вигляді. Він потребує конкретної розрахункової схеми з реальними розмірами (рис. 2.5).

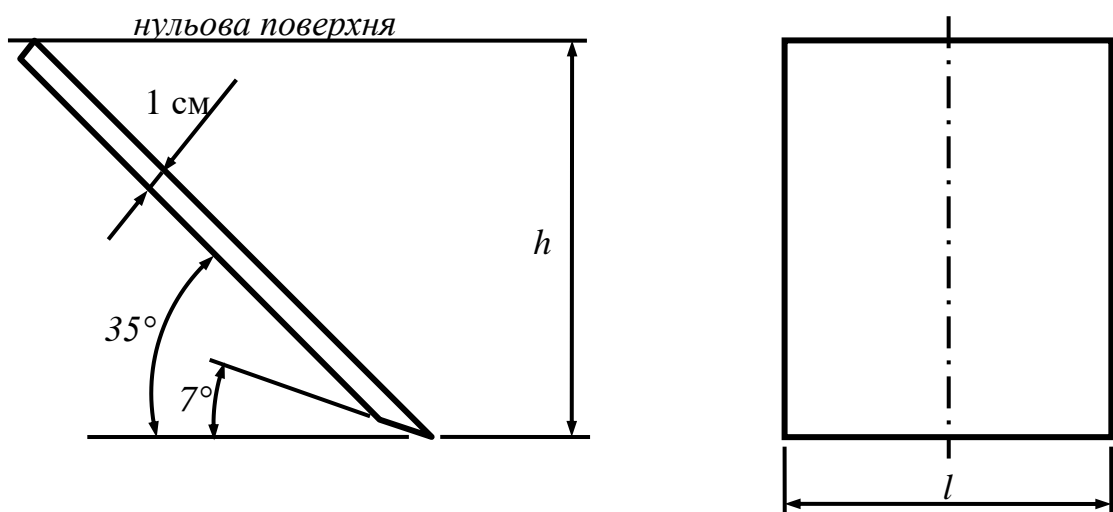


Рисунок 2.5 – Модельований двогранний клин

Модель, що розробляється, повинна служити інструментом для досліджень процесів в ґрунті. При цьому не розглядається поведінка самого робочого органу. Тому ми моделюємо ґрунт, як потік рідини, що протікає в прямокутному каналі, а робочий орган вирізується з цього каналу. Таким чином, виходить перешкода у вигляді клину. Параметри каналу виберемо дослідним шляхом таким чином, щоб він охоплював увесь процес різання ґрунту (рис. 2.6). Оскільки перед клином йде призма сколювання з кутом нахилу бічної площини близько 45° , з урахуванням того, що процес симетричний, і можна обмежитися моделюванням тільки його половини, мінімальна ширина каналу дорівнює

$$b = \frac{l}{2} + h$$

де l - ширина клину;

h - глибина різання.

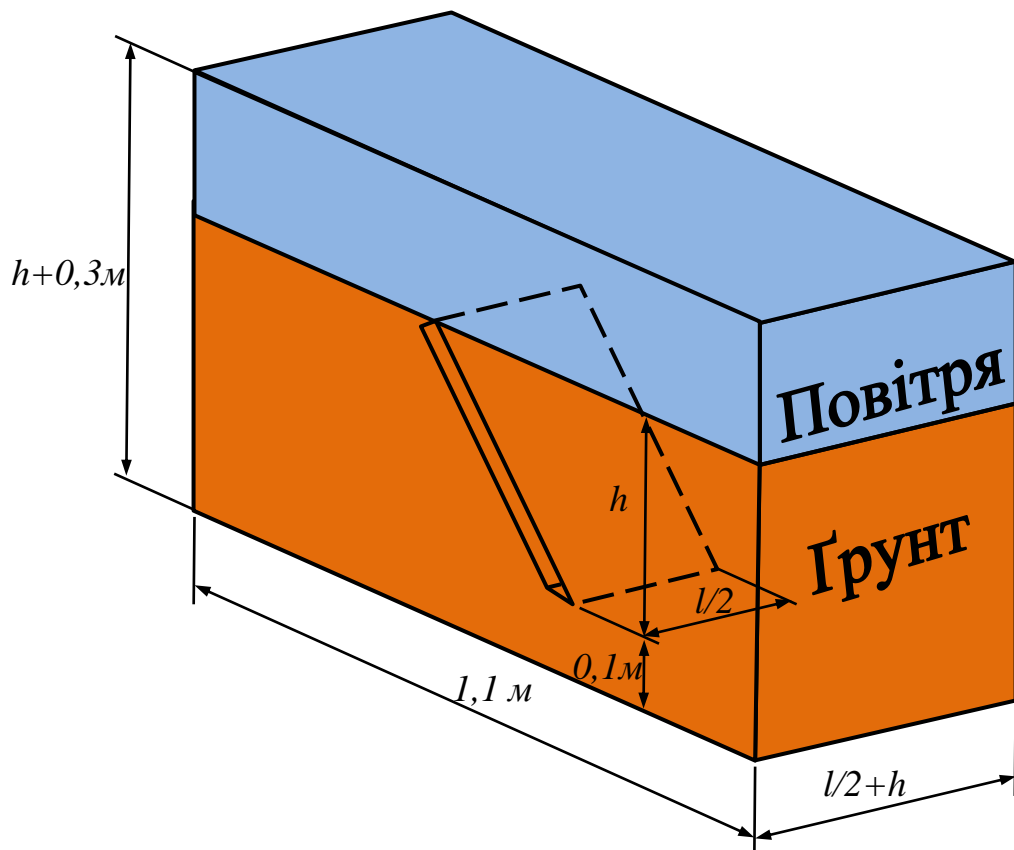


Рисунок 2.6 – Геометрична модель ґрунтового каналу

При дослідженні процесів механічного руйнування ґрунту цікаво прослідити зміну рельєфу поверхні поля. Тому спочатку, на етапі створення геометричної моделі, закладається можливість розгляду одночасно ґрунтового і повітряного середовища над поверхнею ґрунту (рис 2.6). Враховуючи те, що ґрунт і повітря рухаються відносно стойки з однаковою швидкістю, ми отримуємо двокомпонентне гомогенне середовище [56, 57].

Двогранний клин – це симетричний робочий орган, тому раціонально розглядати тільки його половину. При цьому площину симетрії представимо у вигляді граничної умови.

2.4 Побудова сітки скінченних елементів

Щоб мати можливість змінювати її густину сітки скінченних елементів, при її побудові використані об'ємні кінцеві елементи трьох видів - тетраедри, призми і піраміди. Шляхом серії пошукових експериментів встановлені розміри скінченних елементів, при яких вони не впливають на отримуваний результат. Максимальний розмір прийнятий рівним 5 см. Згущування сітки слід виконувати в місцях найбільшої міри зміни досліджуваних величин. В даному випадку - це область навколо стойки (рис. 2.7). У цьому місці створено п'ять тонких шарів дрібної сітки, з довжиною кожного елементу 2 см. По мірі видалення від стойки, розмір скінченних елементів збільшується. Недоліком цієї моделі є те, що не врахована ще одна складна для розрахунків ділянка - це поверхня розподілу повітря і ґрунту. Проте наперед неможливо точно передбачити її розташування. Тому до розрахунку представляється сітка саме у такому вигляді, а для зниження похибки грубого розбиття, вона буде уточнена по мірі рішення задачі.

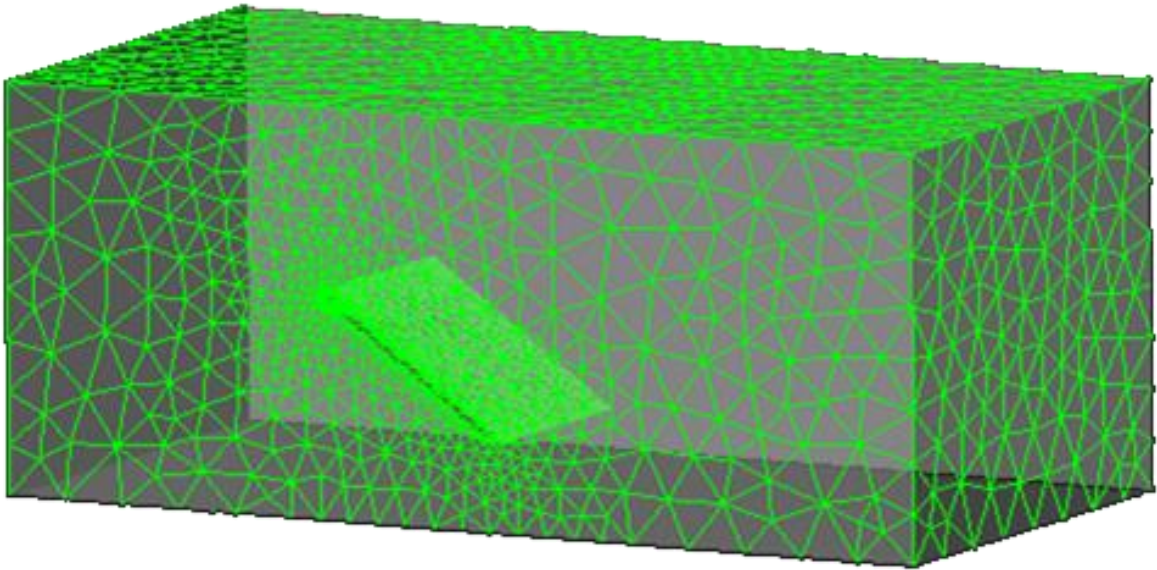


Рисунок 2.7 – Скінченно-елементна модель ґрунтового-повітряного
гомогенного середовища

Кількість скінченних елементів і вузлів змінюється залежно від висоти і
ширини клину. Для ширини клину $l = 0,5$ м і його висоти $h = 0,2$ м
характеристики скінченно-елементної моделі наступні:

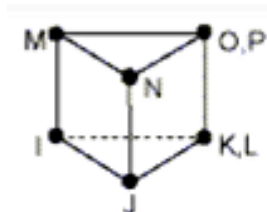
загальна кількість вузлів - 18766;

загальна кількість елементів - 85119;

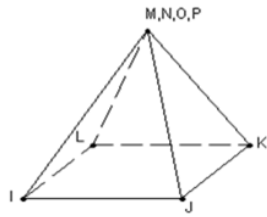
з них:



тетраедрів - 76887;



призм - 8185;



пірамід - 47.

2.5 Завдання граничних умов

Загальні характеристики процесу:

Процес ізотермічний; температура - 25°C; щільність повітря - 1,185 кг/м³; щільність ґрунтового середовища – 1300 кг/м³; прискорення вільного падіння діє вертикально вниз і дорівнює 9,81м/с². Коефіцієнт динамічної в'язкості задається на мові Fortran функцією від градієнта швидкості потоку (2.3)

$$\mu = G / (\min(\text{UpperS}, \max(\text{sstrnr}, \text{LowerS}))) + K, \quad (2.6)$$

де K - коефіцієнт динамічної в'язкості на ділянці ньютонівської течії (μ_0 - задається відповідно до плану експерименту);

G - динамічний опір зсуву (τ_0 - задається відповідно до плану експерименту);

sstrnr - градієнт швидкості потоку ($\partial v / \partial n$);

UpperS - верхнє допустиме значення градієнта швидкості потоку (набуваємо рекомендованого значення $D_{\max} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$);

LowerS - нижнє допустиме значення градієнта швидкості потоку (набуваємо рекомендованого значення $D_{\min} = 0,001 \text{ c}^{-1}$).

Суть приведеної формули полягає в наступному – доки градієнт швидкості потоку (sstrnr) менше наперед заданого мінімального значення, тобто близький до нуля, в знаменнику стоятиме саме ця мінімальна величина, і коефіцієнт в'язкості буде значно завищений, а напруження стрімко зростає.

При входженні градієнта швидкості потоку в межі, що допускаються, а напруження в область динамічного опору зсуву, рідина поводитиметься, як ньютонівська з коефіцієнтом динамічної в'язкості μ_0 (К).

У моделі задано 5 видів граничних умов: вхідний потік, вихідний потік, вільна поверхня, стіна каналу, симетрія (рис. 2.8).

Вхідний потік

Оскільки в базових дослідженнях Зеленського швидкість не врахована, як малозначимий чинник, при моделюванні швидкість потоку задана з урахуванням найкращої збіжності завдання і склала 0,4 м/с. Її напрям - перпендикулярно до вхідної площини, вона рівномірно розподілена по поверхні межі досліджуваного об'єму і має однакове значення для повітря і ґрунтового середовища. Глибина ґрунтового середовища відповідає необхідним умовам експерименту.

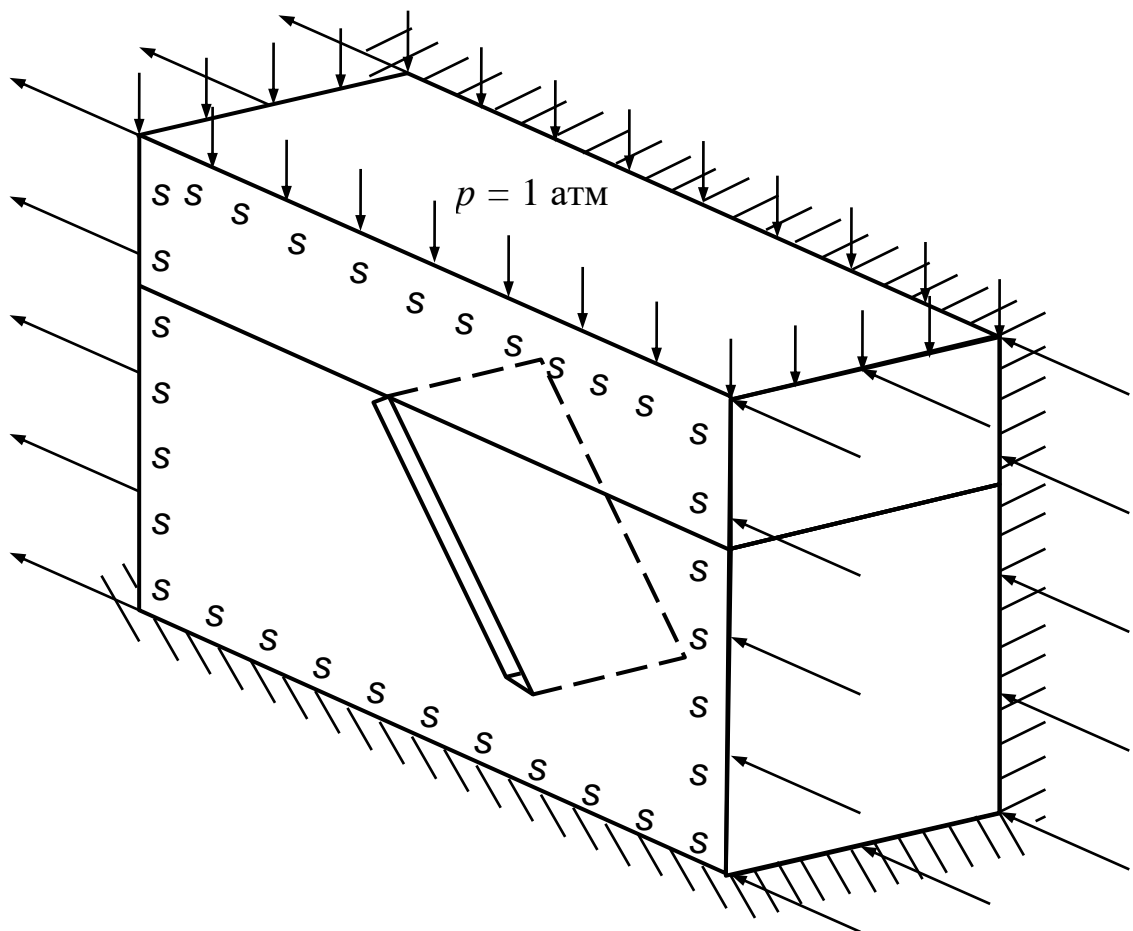


Рисунок 2.8 – Граничні умови моделі проходження стойки у ґрунтовому середовищі

Вихідний потік

Після проходження стойки ґрунтове середовище в першому наближенні має таку ж глибину, як і на вході h . Зовнішній тиск - постійний, статичний.

Вільна поверхня

Під вільною поверхнею мається на увазі верхня площина повітряного шару. На неї впливає тільки атмосферний тиск.

Стіна каналу

Модельований канал має дві постійних жорстких площин – нижня площина і площина, що відділяє даний об'єм від іншого поля. Характеристика потоку, що визначає ці поверхні, як стіни - нульова швидкість потоку площини. У моделі не враховується шорсткість стін, що дозволяє виключити погрішність, пов'язану з кінцевими розмірами каналу по відношенню до нескінченного простору реального процесу.

Симетрія

На самому початку ми сказали, що робочий орган симетричний і з метою заощадження часу розрахунків і ресурсів машини досить розглянути тільки одну його половину. На цьому етапі вводиться гранична умова симетричності, що дозволяє врахувати другу половину моделі.

2.6 Розрахунок

Програмний комплекс Ansys CFX здійснює розрахунок в автоматичному режимі. При цьому виконується уточнення сітки кінцевих елементів в найбільш проблемних місцях. В даному випадку таким місцем є поверхня ґрунтового середовища. Сітка в остаточному виді представлена на рис. 2.9. Тут виразно видно межа ґрунт-повітря у вигляді шару сітки, що згущується.

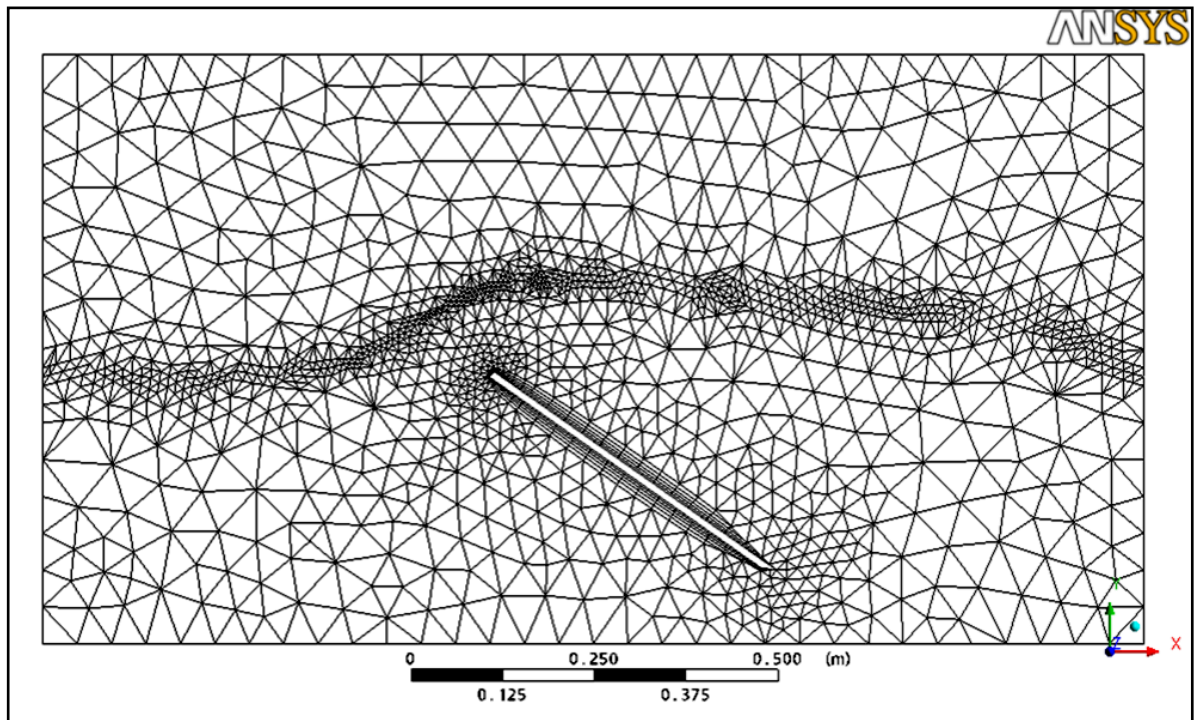


Рисунок 2.9 – Остаточний вид скінченно-елементної моделі.

2.7 Постпроцесорна обробка результатів

Використання в якості ґрунтового середовища неньютонівської рідини Бінгама, у поєднанні з розрахунком завдання методом скінченних елементів дає можливість отримання великої кількості інформації для подальших досліджень. Розглянемо деякі з них.

Мабуть, уперше з'являється можливість визначити швидкість, напрям, переміщення по шарах окремих часток ґрунтового середовища. Інформацію про усе це дають лінії струму.

Як вже було вказано вище, дуже важливо при моделюванні отримати уявлення про зміну форми поверхні ґрунту. Для цього розглядається саме гомогенне середовище і знаходиться межа між ґрунтом і повітрям (рис. 2.10). На рисунку добре видно призма сколювання, яка спостерігається при руйнуванні реального ґрунту клином.

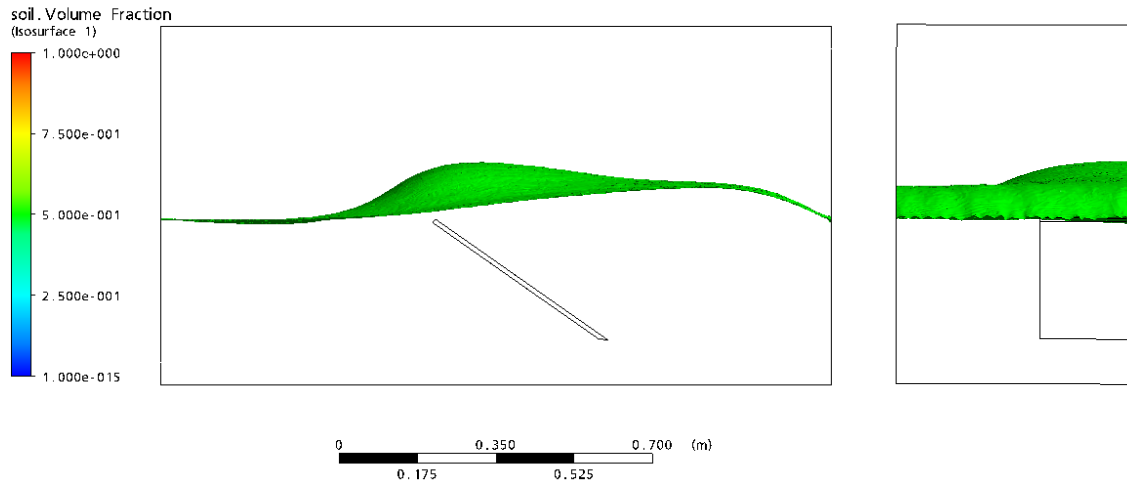


Рисунок 2.10 – Поверхня ґрунту під час проходження в ній клину.

У цій роботі нас цікавить опір клину по горизонталі. Для визначення цього показника можна скористатися тиском середовища на робочий орган (рис. 2.11). Горизонтальна складова інтегральної суми цього тиску по поверхні робочого органу дає загальний опір клину. Визначаємо його за допомогою функції вбудованої мови CCL - *force_x()@klin*. Тут під значенням *klin* розуміється сукупність усіх граней клину. Таким чином, ми отримуємо сумарну силу, діючу на усі грані робочого органу.

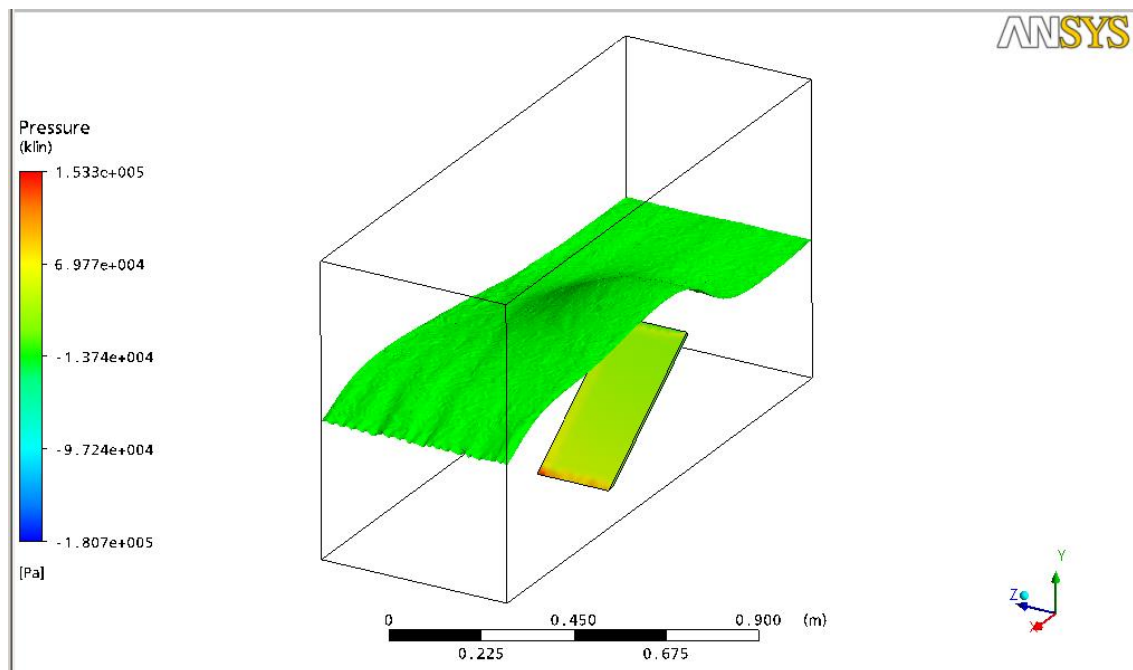


Рисунок 2.11 – Розподіл тиску на поверхні клину

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РЕАЛЬНОГО ҐРУНТУ І СЕРЕДОВИЩЕМ БІНГАМА

3.1 Методика досліджень

Для успішного використання середовища Бінгама в якості ґрунтового середовища необхідно встановити її основні характеристики – межу плинності і коефіцієнт динамічної в'язкості. Проте реальний ґрунт не має цих характеристик. Тому ми вважаємо, що розробка методики їх визначення в лабораторних умовах - це не ефективний підхід. Набагато зручніше використовувати відомі характеристики і методики їх визначення. А характеристики віртуальні визначимо шляхом зіставлення результатів реальних і модельних експериментів.

Якщо прийняти рідину середовищем Бінгама, сила опору клину P_m залежатиме від характеристик середовища

$$P_m = f(\tau_0, \mu_0), \quad (3.1)$$

де τ_0 - динамічний опір зрушення;

μ_0 - коефіцієнт динамічної в'язкості.

Припустимо, що ці характеристики пов'язані з механічними характеристиками ґрунту

$$\tau_0 = a \cdot C; \quad \mu_0 = b \cdot \varphi \quad (3.2)$$

де a, b – поправочні коефіцієнти;

C – коефіцієнт зчеплення ґрунту;

φ – кут внутрішнього тертя ґрунту.

Тоді

$$P_m = f(aC, b\varphi), \quad (3.3)$$

якщо експеримент проводиться на одному і тому ж ґрунті, то його характеристики будуть постійні: $C = \text{const}$; $\varphi = \text{const}$. Таким чином, отримуємо наступну функцію

$$P_m = f(a, b). \quad (3.4)$$

Функція (3.4) показує основний характер експериментів, що проводяться:

- змінюваними чинниками будуть поправочні коефіцієнти a і b ;
- кожен варіант досліду супроводжуватиметься визначенням за допомогою розробленої моделі сили опору клину P_m , з геометричними параметрами клину відповідно до таблиці 1.3;
- отримані результати необхідно порівняти з експериментами А. Н. Зеленіна на реальному ґрунті;
- мета досліджень - визначення значень поправочних коефіцієнтів, при яких різниця між результатами моделювання і натурних експериментів буде не значуща.

Остаточно про ступінь збігу результатів натурального експерименту і моделювання судитимемо по коефіцієнту детермінації. Він показує зв'язок між двома сукупностями значень.

$$R^2 = \frac{\sum (y - \bar{y}_{\text{факт}})^2}{\sum (y_{\text{факт}} - \bar{y}_{\text{факт}})^2}, \quad (3.5)$$

де $y_{\text{факт}}$ – фактичне значення шуканої функції;

$\bar{y}_{\text{факт}}$ – середнє значення шуканої функції.

Чим вище зв'язок, тим менше відмінність між сукупностями, при цьому вказаний коефіцієнт прагне до одиниці. І навпаки, чим менше зв'язок, тим ближче коефіцієнт до нуля.

3.2 Пошуковий експеримент

Перш, ніж приступати до планування експерименту, необхідно в першому наближенні знайти межі зміни шуканих коефіцієнтів. Для цього, з метою зменшення рахункового часу, проведемо експеримент на моделі, що

має мінімальну кількість кінцевих елементів. Це варіант з мінімальною шириною клину: $C_0 = 8$ кПа; $\varphi = 38,5^\circ$; $l = 0,37$ м; $h = 0,27$ м; $P_3 = 1,89$ кН. Визначимо порядок, який повинні мати коефіцієнти (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Результати пошукових експериментів на моделі

№	Поправочні коефіцієнти		Характеристики середовища Бінгама		Сила опору клину		Похибка
	a	b	$\tau_0, \text{Па}$	$\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$	$P_3, \text{кН}$	$P_m, \text{кН}$	$\Delta, \%$
1	1	10	8000	385	1,89	32,94	1642
2	1	1	8000	38,5		31,08	1544
3	0,1	10	800	385		7,26	284
4	0,1	1	800	38,5		5,34	182
5	0,01	1	80	38,5		0,68	-64,02
6	0,01	10	80	385		3,296	74,39
7	0,02	1	160	38,5		1,084	-42,64
8	0,02	10	160	385		3,86	104,23
9	0,015	10	120	385		3,59	89,94
10	0,01	5	80	192,5		1,84	-2,6
11	0,02	2	160	77		1,34	-29,1
12	0,02	5	160	192,5		2,58	36,5

Графік похибок розрахунку (рис. 3.1) показує, що найбільш достовірне значення характеристик ґрунтового середовища знаходяться в межах:

- динамічний опір зсуву $\tau_0 = 40 \dots 160$ Па;
- коефіцієнт динамічної в'язкості $\mu_0 = 77 \dots 270$ Па·с.

Отже, межі варіювання шуканих поправочних коефіцієнтів будуть наступними: $a = 0,005 \dots 0,02$; $b = 2 \dots 7$.

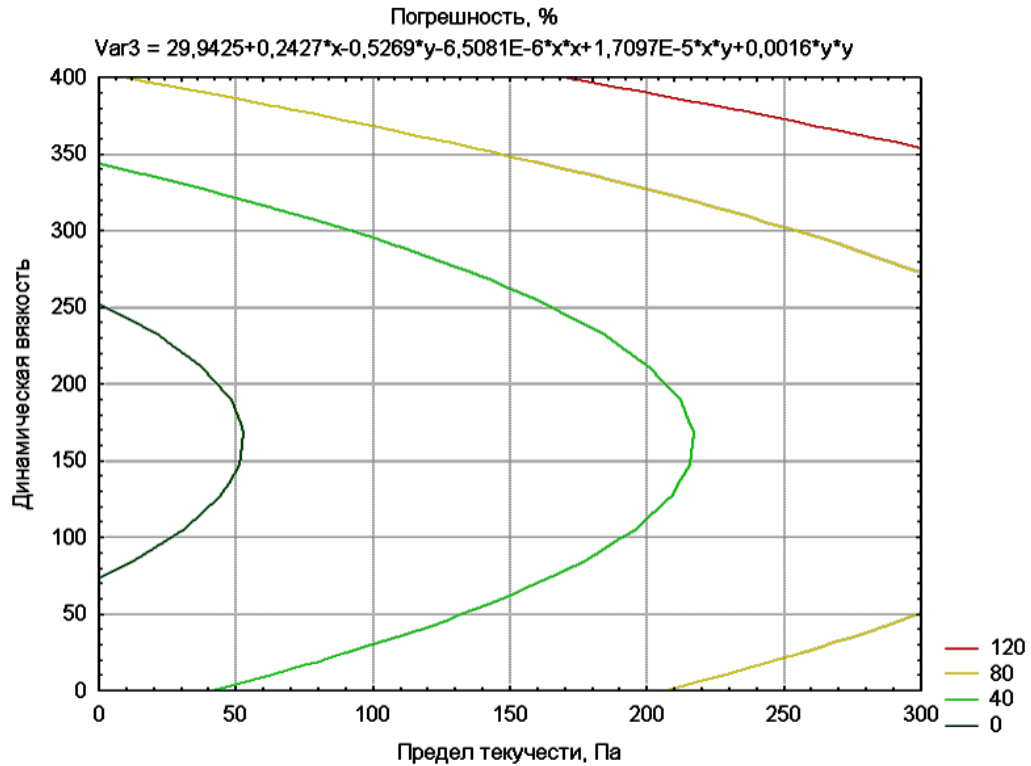


Рисунок 3.1 – Залежність похибки розрахунку від прийнятих характеристик ґрунтового середовища

3.3 План експерименту

Використовуючи знайдені в ході пошукових експериментів межі варіювання поправочних коефіцієнтів для механічних характеристик ґрунтового середовища, складемо план експерименту. Щоб отримати більш точні результати, закладемо в план експерименту три рівня варіювання факторів і виконаємо повний двофакторний експеримент (таблиця 3.2 - 3.3).

Таблиця 3.2 – Рівні варіювання факторів

Рівні	Фактори			Характеристики ґрунтового середовища	
	в закодованому вигляді	a	b	$\tau_0, \text{Па}$	$\mu_0, \text{Па} \cdot \text{с}$
1-й рівень	-1	0,005	2	40	77
2-й рівень	0	0,0125	4,5	100	173,25
3-й рівень	1	0,02	7	160	269,5

Таблиця 3.3 – План експерименту в закодованому вигляді

<i>N</i>	τ_0	μ_0
1	-1,0	-1,0
2	-1,0	0,0
3	-1,0	1,0
4	0,0	-1,0
5	0,0	0,0

<i>N</i>	τ_0	μ_0
6	0,0	1,0
7	1,0	-1,0
8	1,0	0,0
9	1,0	1,0

3.4 Аналіз отриманих результатів

Проведений двофакторний експеримент дозволив отримати первісну базу даних, що дозволяє простежити основні закономірності впливу характеристик середовища Бінгама на опір клину (таблиця 3.4 - 3.12). А також накласти їх на результати натурних експериментів, проведених з реальною ґрунтом.

Таблиця 3.4 – Результати моделювання відповідно до вибраного плану експерименту (1-й рядок)

№	Характеристики середовища				Геометричні характеристики клин			Сила опору		Похибка Δ , %
	a	b	τ_0 , Па	μ_0 , Па·с	Довжина l , м	Глибина різання h , м	Площа перерізу A , м ²	Натурний експеримент P_e , кН	Модель P_m , кН	
1	0,005	2	40	77	0,4	0,27	0,108	2,04	0,98	0,51
2					0,5		0,135	4,08	1,3	0,68
3					0,6		0,162	6,12	1,76	0,71
4					0,7		0,189	8,16	2,12	0,74
5					0,4	0,20	0,08	1,02	0,88	0,13
6					0,5		0,1	2,81	0,98	0,65
7					0,6		0,12	4,08	1,12	0,70
8					0,7		0,14	6,12	1,22	0,72
9					0,5	0,15	0,076	1,28	0,76	0,40
10					0,6		0,09	2,55	1,22	0,52
11					0,7		0,11	3,83	1,6	0,60

Таблиця 3.5 – Результати моделювання відповідно до вибраного плану експерименту (2-й рядок)

№	Характеристики середовища				Геометричні характеристики клину			Сила опору		Похибка Δ , %
	a	b	τ_0 , Па	μ_0 , Па·с	Довжина l , м	Глибина різання h , м	Площа перерізу A , м ²	Натурний експеримент P_e , кН	Модель P_m , кН	
1	0,005	4,5	40	173,25	0,4	0,27	0,108	2,04	1,86	8,82
2					0,5		0,135	4,08	2,42	40,69
3					0,6		0,162	6,12	3,18	48,04
4					0,7		0,189	8,16	3,76	53,92
5					0,4	0,20	0,08	1,02	1,66	62,75
6					0,5		0,1	2,81	1,8	35,94
7					0,6		0,12	4,08	2,58	36,76
8					0,7		0,14	6,12	3,22	47,39
9					0,5	0,15	0,076	1,28	1,38	7,81
10					0,6		0,09	2,55	2,16	15,29
11					0,7		0,11	3,83	2,9	24,28

Таблиця 3.6 – Результати моделювання відповідно до вибраного плану експерименту (3-й рядок)

№	Характеристики середовища				Геометричні характеристики клину			Сила опору		Похибка Δ , %
	a	b	τ_0 , Па	μ_0 , Па·с	Довжина l , м	Глибина різання h , м	Площа перерізу A , м ²	Натурний експеримент P_e , кН	Модель P_m , кН	
1	0,005	7	40	269,5	0,4	0,27	0,108	2,04	2,72	33,33
2					0,5		0,135	4,08	3,5	14,22
3					0,6		0,162	6,12	4,56	25,49
4					0,7		0,189	8,16	6,62	18,87
5					0,4	0,20	0,08	1,02	2,38	133,33
6					0,5		0,1	2,81	2,62	6,76
7					0,6		0,12	4,08	3,58	12,25
8					0,7		0,14	6,12	4,52	26,14
9					0,5	0,15	0,076	1,28	2,02	57,81
10					0,6		0,09	2,55	2,98	16,86
11					0,7		0,11	3,83	4,04	5,48

Таблиця 3.7 - Результати моделювання відповідно до вибраного плану експерименту (4-й рядок)

№	Характеристики середовища				Геометричні характеристики клин			Сила опору		Похибка Δ , %
	a	b	τ_0 , Па	μ_0 , Па·з	Довжина l , м	Глибина різання h , м	Площа перерізу A , м^2	Натурний експеримент P_e , кН	Модель P_m , кН	
1	0,0125	2	100	77	0,4	0,27	0,108	2,04	1,34	34,31
2					0,5		0,135	4,08	1,74	57,35
3					0,6		0,162	6,12	2,28	62,74
4					0,7		0,189	8,16	3,02	62,99
5					0,4	0,20	0,08	1,02	1,18	15,68
6					0,5		0,1	2,81	1,32	53,02
7					0,6		0,12	4,08	1,82	55,39
8					0,7		0,14	6,12	2,44	60,13
9					0,5	0,15	0,076	1,28	1,00	21,87
10					0,6		0,09	2,55	1,50	41,17
11					0,7		0,11	3,83	1,92	49,86

Таблиця 3.8 – Результати моделювання відповідно до вибраного плану експерименту (5-й рядок)

№	Характеристики середовища				Геометричні характеристики клину			Сила опору		Похибка Δ , %
	a	b	τ_0 , Па	μ_0 , Па·с	Довжина l , м	Глибина різання h , м	Площа перерізу A , м ²	Натурний експеримент P_e , кН	Модель P_m , кН	
1	0,0125	4,5	100	173,25	0,4	0,27	0,108	2,04	2,27	11,27
2					0,5		0,135	4,08	2,94	27,94
3					0,6		0,162	6,12	3,82	37,58
4					0,7		0,189	8,16	4,98	38,97
5					0,4	0,20	0,08	1,02	2,00	96,08
6					0,5		0,1	2,81	2,18	22,42
7					0,6		0,12	4,08	3,04	25,49
8					0,7		0,14	6,12	3,96	35,29
9					0,5	0,15	0,076	1,28	1,68	31,25
10					0,6		0,09	2,55	2,48	2,75
11					0,7		0,11	3,83	3,32	13,32

Таблиця 3.9 – Результати моделювання відповідно до вибраного плану експерименту (6-й рядок)

№	Характеристики середовища				Геометричні характеристики клину			Сила опору		Похибка Δ , %
	a	b	τ_0 , Па	μ_0 , Па·с	Довжина l , м	Глибина різання h , м	Площа перерізу A , м ²	Натурний експеримент P_e , кН	Модель P_m , кН	
1	0,0125	7	100	269,5	0,4	0,27	0,108	2,04	3,14	53,92
2					0,5		0,135	4,08	4,02	1,47
3					0,6		0,162	6,12	5,16	15,69
4					0,7		0,189	8,16	6,64	18,63
5					0,4	0,20	0,08	1,02	2,72	166,67
6					0,5		0,1	2,81	3,00	6,76
7					0,6		0,12	4,08	3,96	2,94
8					0,7		0,14	6,12	5,48	10,46
9					0,5	0,15	0,076	1,28	2,32	81,25
10					0,6		0,09	2,55	3,28	28,63
11					0,7		0,11	3,83	4,28	11,75

Таблиця 3.10 – Результати моделювання відповідно до вибраного плану експерименту (7-й рядок)

№	Характеристики середовища				Геометричні характеристики клину			Сила опору		Похибка Δ , %
	a	b	τ_0 , Па	μ_0 , Па·с	Довжина l , м	Глибина різання h , м	Площа перерізу A , м ²	Натурний експеримент P_e , кН	Модель P_m , кН	
1	0,02	2	160	77	0,4	0,27	0,108	2,04	1,72	15,69
2					0,5		0,135	4,08	2,24	45,10
3					0,6		0,162	6,12	2,82	53,92
4					0,7		0,189	8,16	3,50	57,11
5					0,4	0,20	0,08	1,02	1,50	47,06
6					0,5		0,1	2,81	1,68	40,21
7					0,6		0,12	4,08	2,24	45,10
8					0,7		0,14	6,12	2,86	53,27
9					0,5	0,15	0,076	1,28	1,26	1,56
10					0,6		0,09	2,55	1,80	29,41
11					0,7		0,11	3,83	2,38	37,86

Таблиця 3.11 – Результати моделювання відповідно до вибраного плану експерименту (8-й рядок)

№	Характеристики середовища				Геометричні характеристики клину			Сила опору		Похибка Δ , %
	a	b	τ_0 , Па	μ_0 , Па·с	Довжина l , м	Глибина різання h , м	Площа перерізу A , м ²	Натурний експеримент P_e , кН	Модель P_m , кН	
1	0,02	4,5	160	173,25	0,4	0,27	0,108	2,04	2,56	25,49
2					0,5		0,135	4,08	3,46	0,15
3					0,6		0,162	6,12	4,46	0,27
4					0,7		0,189	8,16	5,62	0,31
5					0,4	0,20	0,08	1,02	2,32	1,27
6					0,5		0,1	2,81	2,58	0,08
7					0,6		0,12	4,08	3,52	0,14
8					0,7		0,14	6,12	4,56	0,25
9					0,5	0,15	0,076	1,28	1,98	0,55
10					0,6		0,09	2,55	2,80	0,10
11					0,7		0,11	3,83	3,92	0,02

Таблиця 3.12 – Результати моделювання відповідно до вибраного плану експерименту (9-й рядок)

№	Характеристики середовища				Геометричні характеристики клин			Сила опору		Похибка Δ , %
	a	b	τ_0 , Па	μ_0 , Па·с	Довжина l , м	Глибина різання h , м	Площа перерізу A , м ²	Натурний експеримент P_e , кН	Модель P_m , кН	
1	0,02	7	160	269,5	0,4	0,27	0,108	2,04	3,56	74,51
2					0,5		0,135	4,08	4,54	11,27
3					0,6		0,162	6,12	5,78	5,56
4					0,7		0,189	8,16	7,38	9,56
5					0,4	0,20	0,08	1,02	3,04	198,04
6					0,5		0,1	2,81	3,38	20,28
7					0,6		0,12	4,08	4,12	0,98
8					0,7		0,14	6,12	5,06	17,32
9					0,5	0,15	0,076	1,28	2,62	104,69
10					0,6		0,09	2,55	3,58	40,39
11					0,7		0,11	3,83	4,62	20,63

За отриманими даними побудуємо графіки впливу геометричних параметрів клину на його опір з урахуванням різних варіантів динамічного опору зрушення і коефіцієнта динамічної в'язкості. Зіставимо їх з аналогічним графіком для реального ґрунту (рис. 3.2 - 3.10).

Приведені графіки показують ряд тенденцій. По-перше, їх форма в усіх варіантах характеристик відповідає формі графіків натурного експерименту - невелике зменшення нахилу ділянок наростання опору у міру збільшення ширини клину при зменшенні глибини обробки; крім того розмах значень опору в межах однієї глибини знижується разом із зменшенням глибини.



Рисунок 3.2 – Порівняння результатів натурного експерименту і моделювання.

1-й рядок плану експерименту – $a = 0,005$, $b = 2$ ($\tau_0 = 40$ Па; $\mu_0 = 77$ Па·с)



Рисунок 3.3 – Порівняння результатів натурного експерименту і моделювання.

2-й рядок плану експерименту – $a = 0,005$, $b = 4,5$ ($\tau_0 = 40$ Па; $\mu_0 = 173,25$ Па·с)



Рисунок 3.4 – Порівняння результатів натурного експерименту і моделювання.

3-й рядок плану експерименту – $a = 0,005$, $b = 7$ ($\tau_0 = 40$ Па; $\mu_0 = 269,5$ Па·с)



Рисунок 3.5 – Порівняння результатів натурального експерименту і моделювання.

4-й рядок плану експерименту - $a=0,0125$, $b=2$ ($\tau_0=100$ Па; $\mu_0=77$ Па·с)



Рисунок 3.6 – Порівняння результатів натурального експерименту і моделювання.

5-й рядок плану експерименту – $a = 0,0125$, $b = 4,5$ ($\tau_0 = 100$ Па; $\mu_0 = 173,25$ Па·с)



Рисунок 3.7 – Порівняння результатів натурального експерименту і моделювання.

6-й рядок плану експерименту – $a = 0,0125$, $b = 7$ ($\tau_0 = 100$ Па; $\mu_0 = 269,5$ Па·с)



Рисунок 3.8 – Порівняння результатів натурального експерименту і моделювання.

7-й рядок плану експерименту – $a = 0,02$, $b = 2$ ($\tau_0 = 160$ Па; $\mu_0 = 77$ Па·с)



Рисунок 3.9 – Порівняння результатів натурального експерименту і моделювання.

8-й рядок плану експерименту – $a = 0,02$, $b = 4,5$ ($\tau_0 = 160$ Па; $\mu_0 = 173,25$ Па·с)



Рисунок 3.10 – Порівняння результатів натурального експерименту і моделювання.

9-й рядок плану експерименту – $a = 0,02$, $b = 7$ ($\tau_0 = 160$ Па; $\mu_0 = 269,5$ Па·с).

На жаль, для проведених експериментів не можна визначити статистичні критерії порівняння експериментальних і модельних результатів. Це пов'язано з тим, що їх дисперсії значно відрізняються і отримувані критерії є недостовірними. Серед використаних варіантів найбільш близьким до реальних величин виявився 3-й і 9-й. Ці два варіанти об'єднує максимальне значення коефіцієнта в'язкості $\mu = 269,5$ Па·с. Графіки показують, що саме ця характеристика визначає міру впливу геометрії робочого органу на його опір, або іншими словами розкид опорів по вертикалі на графіці. Проте і для цих випадків погрішність значень занадто велика. Тому поступимо таким чином. На основі даних отриманих в ході моделювання отримаємо математичну модель впливу геометричних параметрів і характеристик середовища Бінгама на опір клину. Після чого, вирішимо її як рівняння відносно динамічного опору зсуву і коефіцієнта динамічної в'язкості, спільно з результатами натурного експерименту. Таким чином, ми набудемо значень цих характеристик, відповідно легкого супіску вологістю $\omega=9,5\%$ і кількістю ударів щільноміра $C = 8 \dots 9$.

Математичну модель опору клину будуюмо на основі статичного полінома другої міри :

$$P_m = b_0 + b_1\tau_0 + b_2\mu_0 + b_3l + b_4h + b_5\tau_0\mu_0 + b_6\tau_0l + b_7\tau_0h + b_8\mu_0l + b_9\mu_0h + b_{10}lh + b_{11}\tau_0^2 + b_{12}\mu_0^2 + b_{13}l^2 + b_{14}h^2.$$

Використовуючи 99 варіантів досвіду, визначені коефіцієнти регресії, які за допомогою t -критерія Стьюдента перевірені на значущість, виконаний покроковий регресійний аналіз, в ході якого незначущі коефіцієнти (таблиця. 3.13).

Таблиця 3.13 – Значущі коефіцієнти математичної моделі опору клину

Значущі чинники	Коефіцієнти регресії	t -критерій Стьюдента
Вільний член	6,5376	6,72787
μ_0	-0,0158	-8,56475
l	-18,9073	-7,07259
h	-15,6160	-6,04370
$\tau_0 h$	0,0339	18,83182
$\mu_0 l$	0,0290	12,54610
$\mu_0 h$	0,0518	10,12034
lh	24,6419	5,97966
l^2	14,2316	7,02421

Таким чином, остаточно отримуємо наступну модель:

$$P_m = 6,5376 - 0,0158\mu_0 - 18,9073l - 15,6160h + 0,0339\tau_0 h + 0,0290\mu_0 l + 0,0518\mu_0 h + 24,6419lh + 14,2316l^2.$$

Оскільки модель отримана на основі імітаційної, яка виключає вплив випадкових чинників на результат, вона має високі характеристики адекватності - F -критерій Фішера $F(8,90)=628,55$, рівень значущості $p<0,00001$, коефіцієнт детермінації $R^2=0,981$.

Ця модель підтверджує припущення про більший вплив на опір клину коефіцієнта динамічної в'язкості μ в порівнянні з динамічним опором зсуву τ_0 .

Підставивши в отриману модель дані натурних експериментів можна знайти значення характеристик середовища Бінгама, які дадуть результати, що відповідають реальному ґрунту. Тут є всього дві характеристики, тому для їх визначення досить скласти два рівняння (таблиця 3.14). Скористаємося даними приведеними в таблиці 1.3, як узагальненими значеннями.

Таблиця 3.14 – Складання системи рівнянь для визначення характеристик середовища Бінгама

Довжин а l , м	Глибина h , м	Сила різання клином P , кН	Питомий опір, кН/м ²	Рівняння
0, 67	0,15	3,45	34,5	$11,0 \cdot \tau_0 + 5,09 \cdot \mu_0 = 3058$
0,5	0,20	2,81	28,1	$6,78 \cdot \tau_0 + 9,06 \cdot \mu_0 = 2827$

Рішивши цю систему ми отримаємо наступні результати:

$$\mu_0=203,53; \tau_0=145,02\text{Па.}$$

Перевіримо правильність отриманих значень. Для цього вирішимо комплект тестових завдань ще раз (таблиця 3.15). На цей раз результати вийшли точнішими. Використовуючи ці значення, знайдений коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,86$. Оскільки його значення близьке до 1,0, можна стверджувати про точність розробленої моделі. Використовуючи характеристики середовища Бінгама, знайдемо поправочні коефіцієнти для механічних характеристик ґрунту.

$$a = \frac{\tau_0}{C} = \frac{145,02}{8000} = 0,018; \quad b = \frac{\mu_0}{\varphi} = \frac{203,53}{38,5} = 5,29.$$

Таким чином, використовуючи ці коефіцієнти і розроблену модель можна проводити дослідження на будь-якому типі ґрунту. Оскільки в якості тестових експериментів прийняті досліді на двогранному клині, який є базовою складовою будь-якого типу робочого органу, цю модель можна поширити на переважну кількість існуючих робочих органів.

Таблиця 3.15 – Порівняння результатів натурального експерименту і моделювання

№	Характеристики середовища				Геометричні характеристики клину			Сила опору		Погрішність Δ , %	Коефіцієнт детермінації R^2
	a	b	τ_0 , Па	μ_0 , Па·с	Довжина l , м	Глибина різання h , м	Площа перерізу A , м ²	Натурний експеримент P_e , кН	Модель P_m , кН		
1	0,018	5,29	145,02	203,53	0,4	0,27	0,108	2,04	2,08	1,96	0,86
2					0,5		0,135	4,08	3,81	6,62	
3					0,6		0,162	6,12	5,82	4,90	
4					0,7		0,189	8,16	7,78	4,66	
5					0,4	0,20	0,08	1,02	1,08	5,88	
6					0,5		0,1	2,81	2,78	1,07	
7					0,6		0,12	4,08	3,95	3,19	
8					0,7		0,14	6,12	5,87	4,08	
9					0,5	0,15	0,076	1,28	1,39	8,59	
10					0,6		0,09	2,55	2,68	5,10	
11					0,7		0,11	3,83	3,89	1,57	

ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасних моделей суцільних середовищ показав, що модель неньютонівської рідини Бінгама дозволить отримати найбільшу кількість адекватної інформації при моделюванні взаємодії робочих органів сільськогосподарських машин з ґрунтовим середовищем.
2. В якості тестових даних для розробки моделі взаємодії робочого органу з ґрунтом на основі середовища Бінгама, якнайкраще підходить інформація, отримана під час досліджень сили різання елементарними профілями, проведених професором А.Н. Зеленіним.
3. Розроблена модель на основі неньютонівської рідини Бінгама і реалізована в програмному комплексі Ansys дозволяє повністю відтворити вказані дослідження проф. А.Н. Зеленіна.
4. Коефіцієнт зчеплення ґрунту C прямо пропорційний динамічному коефіцієнту зсуву середовища Бінгама τ_0 . Коефіцієнт пропорційності дорівнює $a = 0,018$.
5. Кут внутрішнього тертя ґрунту φ прямо пропорційний динамічному коефіцієнту в'язкості середовища Бінгама μ_0 . Коефіцієнт пропорційності дорівнює $b = 5,29$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Keys to Soil Taxonomy: 13-th edition. United States Department of Agriculture, 2022. 410 p.
2. Медведєв В. В., Булигін С. Ю., Вітвіцький С. В. Фізика ґрунту. Навчальний посібник . К.: Видавництво, 2018. 289 с.
3. Гаськевич В. Г., Папіш І. Я., Телегуз О. Г. Фізика ґрунтів. Лабораторний практикум: навчальний посібник. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2021. 170 с.
4. Карташов С. Г., Городецький Е. Ю., Дубка В. С., Москалюк А. А. Вплив оптимальної щільності ґрунту для різних сільськогосподарських культур на врожайність. *Таврійський науковий вісник. Землеробство, рослинництво, овочівництво та багжанництво*. 2012. № 78. С. 21-26.
5. Лялін О. І. Ґрунтознавство: конспект лекцій для студентів 1 курсу спеціальності 206 – Садово-паркове господарство. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 130 с.
6. Смага І. С., Черлінка В. Р., Дмитрук Ю. М. Землеробство. Фактори життя рослин і родючість ґрунту : навч. посібник. Чернівці : Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, 2022. 128 с.
7. Механіка ґрунтів : консп. лекцій / уклад.: В. В. Полевецький, Ю. Т. Собко. Чернівці : Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. 2023. 56 с.
8. Горячкин В. П. Собрание сочинений: в 3 т. Т. 2. М.: Колос, 1968. 455 с.
9. Синеоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение, 1977. 328 с.
10. Зеленин А. Н. и др. Машины для земляных работ. – М.: Машиностроение, 1975. – 424с.
11. Козаченко О. В., Шкрегаль О. М., Каденко В. С. Забезпечення ефективності робочих органів культиваторів: монографія. Харків: ПромАрт, 2021. 238 с.

12. Овчаренко А. А. Овчаренко А. С. Полосная обработка почвы. Объемный глубокорыхлитель для возделывания подсолнечника. LAP. LAMBERT Academic Publishing, 2012. 156 с.
13. Anatolii Kobets, Elchyn Aliiev, Hennadii Tesliuk, Olha Aliieva. Simulation of the interaction between the working bodies of tillage machines and the soil in Simcenter STAR-CCM+. *Machinery & Energetics*, 2023. 14(1). P. 9-23.
14. Frederik F. Foldager, Lars J. Munkholm, Ole Balling, Radu Serban, Dan Negrut, Richard J. Heck, Ole Green. Modeling soil aggregate fracture using the discrete element method. *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 218.
15. Кушнарьов А. С. Дискатор – нове ґрунтообробне знаряддя, що забезпечує перехід від традиційних технологій виробництва сільськогосподарської продукції до енергозберігаючої технології No-till. Біла Церква, 2010. 60 с.
16. Панов И. М., Ветохин В. И. Физические основы механики почв. К.: Феникс, 2008. 266 с.
17. Кандауров И. И. Механика зернистых средств и ее применение в строительстве [2-е изд., испр. и перераб.]. Л.: Стройиздат, 1988. 280 с.
18. Шевченко І. А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища : навчально-наукове видання. К. : ВД "Вініченко", 2016. 320 с.
19. Бакум М. В., Ящук Д. А. Проектування ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами: навч. посібник до лабораторно-практичних та індивідуально-консультативних занять. Харків: ХНТУСГ, 2012. 34 с.
20. Ковбаса В. П. Механіко-технологічне обґрунтування оптимізації взаємодії робочих органів з ґрунтом : автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.05.11. Київ, 2006. 35 с.
21. Shmulevich I. State of the art modeling of soil-tillage interaction using discrete element method. *Soil Tillage Res.* 2010. 111 (1). P. 41-53.
22. Sadek M. A, Chen Y. Feasibility of using PFC3D to simulate soil flow resulting from a simple soil-engaging tool. *Trans. ASABE*. 2015. 58 (4). P. 987-996

- 23.Chen Y., Munkholm L. J., Nyord T. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils. *Soil Tillage Res.* 2013. Vol. 126. P. 34-41.
- 24.Coetzee C. J. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape. *Powder Technol.*, 297 (2016), pp. 50-70.
- 25.James B. Barr, Jacky M.A. Desbiolles, John M. Fielke, Mustafa Ucgul, Development and field evaluation of a high-speed no-till seeding system. *Soil and Tillage Research.* 2019. Vol. 194, 2019.
- 26.Zhang, J., Xia, M., Chen, W., Yuan, D., Wu, C., & Zhu, J. Simulation analysis and experiments for blade-soilstraw interaction under deep ploughing based on the discrete element method. *Agriculture.* 2023. Vol. 13 (136).
- 27.Xu, T., Zhang, R., Wang, Y., Jiang, X., Feng, W., & Wang, J. Simulation and analysis of the working process of soil covering and compacting of precision seeding units based on the coupling model of DEM with MBD. *Processes.* 2022. 10, article number 1103.
- 28.Ucgul M., Saunders C., Fielke J. A. Method of quantifying discrete element method simulations of top soil burial from a mouldboard plough. In *Conference: ASABE Annual International Meeting*. Orlando: American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2023. P. 1-12.
- 29.Aliiev E., Tesliuk H., Zolotovska O., Puhach A., Boiko V., Kobets O. Improving the work process efficiency of a tillage module for pre-sowing tillage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023. 4(1 (124). 60-71.
30. Tagar A. A., Changying J., Adamowski J., Malard J., Qi C. S., Qishuo D., Abbasi N. A. Finite element simulation of soil failure patterns under soil bin and field testing conditions. *Soil and Tillage Research.* 2015. Vol. 145. p. 157-170.
- 31.Ibrahmi A., Bentaher H., Hbaieb M., Maalej A., Mouazen A.M. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and

- energy requirement: Part 1. Finite element simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015. Vol. 117. P. 258-267.
- 32.Okayasu, T., Morishita, K., Terao, H., Mitsuoka, M., Inoue, E., & Fukami, K.O. Modeling and prediction of soil cutting behavior by a plow. *CIGR-Ag Eng. Agriculture & Engineering for a Healthier Life*. 2012. P. 1-6.
- 33.Al-Dosary NMN, Aboukarima AM, Al-Hamed SA. Evaluation of artificial neural network to model performance attributes of a mechanization unit (tractor-chisel plow) under different working variables. *Agriculture*. 2022. 12(6):840.
- 34.Afshar T., Disfani M.M., Arulrajah A., Narsilio G.A., Emam S. Impact of particle shape on breakage of recycled construction and demolition aggregates. *Powder Technol.* 2017. 308. P. 1-12.
- 35.Barbosa L.A.P., Ferraz A.C. d.O. Which evidence attests for soil aggregate rupture? A new criterion to determine aggregate tensile strength. *Soil Tillage*. 2020. Res. 197.
- 36.Kelly C., Olsen N., Negrut D. Billion degree of freedom granular dynamics simulation on commodity hardware via heterogeneous data-type representation. *Multibody Syst. Dyn.* 2020.
- 37.Kheiry A.N.O.; Mohamed M.A.; Omer E.A.; Rahma A.E.; Albahi A. Performance evaluation of Giad chisel plow under different type of soils. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 2017. 8. P. 273–283.
- 38.Кобець А.С., Волик Б. А., Пугач А. М. Ґрунтообробні машини: теорія, конструкція, розрахунок: монографія. Дніпропетровськ : Вид-во «Свидлер А. Л.», 2011. 140 с.
- 39.Сільськогосподарські і меліоративні машини: Навчальний посібник / Кошук О. Б., Лузан П. Г., Мося І. А., Герлянд Т. М., Романов Л. А. К. : ІПТО НАПН України, 2015. 291 с.

40. Система машин і механізмів АПК: Конспект лекцій і практичних. Тернопіль.: Факультет аграрної економіки і менеджменту ТНЕУ, 2016. 124 с.
41. Карпіловський В.С. Метод скінченних елементів і задачі теорії пружності. Київ: «Софія А», 2022. 275 с.
42. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування», «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів і виробів» / А. Я. Карвацький. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 391 с.
43. Дубенець В.Г., Хільчевський В.В., Савченко О.В. Основи методу скінченних елементів: Навчальний посібник. Чернігів: ЧДТУ, 2007. 288 с.
44. Розв'язок задач проектування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD : підручник / І. А. Гришанова, Л. П. Згуровська, Ю. В. Киричук. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. 180 с.
45. Методичний практикум на тему: «Інженерний аналіз в Ansys Workbench» з дисципліни: “Комп'ютерне моделювання процесів обробки матеріалів” для практичних занять і самостійної роботи здобувачів освітнього рівня доктор філософії за спеціальністю 131 “Прикладна механіка” та блоку вибірових дисциплін інших спеціальностей. /Укладачі : Васильків В.В., Данильченко Л.М., Радик Д.Л., Дивдик О.В. Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 58 с.
46. Шевченко Т. О. Гідравліка : конспект лекцій для студентів 1–2 курсів денної та заочної форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 263 – Цивільна безпека, освітніх рівнів «бакалавр» та

- «спеціаліст» спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія. / Т. О. Шевченко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 109 с.
47. Технічна термодинаміка, гідравліка і гідромашини : навч. посібник : у 2 ч. Ч. 2 : Гідродинаміка та гідравлічні машини / В. Е. Дранковський [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків : НТУ "ХПІ", 2020. 223 с.
48. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: Підручник. Київ: Фірма «Інкос», Центр навчальної літератури, 2006. 616 с.
49. Гідрогазодинаміка : навчальний посібник / О. Г. Гусак, С. О. Шарапов, О. В. Ратушний. Суми : Сумський державний університет, 2022. 296 с.
50. Бойко А.В. Гідрогазодинаміка : підручник. Х.: НТУ"ХПІ", 2007. 444 с.
51. Альтман, Э. И. Физическая гидромеханика и теплообмен в многофазных потоках : учеб. пособие : [для студентов-иностранцев] Одеса : Бондаренко М. О., 2017. 134 с.
52. Альтшуль А. Д. и др. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1987. 414с.
53. Смольский Б. М., Шульман З. П., Гориславец В. М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов. Минск: Наука и техника, 1970. 446 с.
54. Сокол Андрій Миколайович. Математичні моделі динаміки багатофазних середовищ у конвертері при продуванні через багатосоплову фурму.- Дисертація канд. техн. наук: 01.05.02, Нац. металург. акад. України. - Дніпродзержинськ, 2012. 180 с.
55. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред: часть 1. М.: Наука, 1987. 464с.
56. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред, часть 2. М.: Наука, 1987. 824с.
57. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения: перевод с англ. М.: Мир, 1972. 440с.

- 58.Kohnke P. ANSYS. Theory Reference. ANSYS, Inc, 1998. 1480 p.
- 59.ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. ANSYS, Inc, 2009. 536 p.
- 60.ANSYS CFX Tutorial. ANSYS, Inc. 2018. 910 p.
- 61.ANSYS. Element Reference. ANSYS, Inc, 2021. 1488 p.
- 62.Поворознюк А.І. Методологія та організація наукових досліджень : навч. посіб. / А. І. Поворознюк, В. І. Панченко, А. Є. Філатова. Х. : "НТМТ", 2016. 192 с.
- 63.Конспект лекцій з дисципліни «Організація та проведення наукових досліджень» для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня освіти по спеціальності – 144 Теплоенергетика / Укл: Баласанян Г.А., Одеса, ДУ «Одеська політехніка», 85 с.
- 64.Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / С.М. Лапач ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 3,31 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с.
- 65.Наукова школа академіка Василенка Петра Мефодійовича: Монографія / Войтюк Д. Г., Вергунов В. А., Мудрук О. С., Деркач О. П. К.: Аграр. освіта, 2005. 72 с.
- 66.Методичні рекомендації до підготовки та захисту кваліфікаційних робіт для здобувачів аграрного факультету / уклад. Л. Є. Берестова, О. В. Івлева, О. А. Овчаренко, Т. О. Степаненко / за заг. ред. Л.А. Мартинець. Київ : СНУ ім. В. Даля, 2023. 45 с.

ДОДАТОК А
ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ НА ВБУДОВАНІЙ МОБІ CCL
(CFX COMMAND LANGUAGE)

FLOW:

DOMAIN: Default Domain

Coord Frame = Coord 0

Domain Type = Fluid

Fluids List = Air at 25 C, soil

Location = B28

BOUNDARY: Back

Boundary Type = SYMMETRY

Location = Back

END

BOUNDARY: Outlet

Boundary Type = OUTLET

Location = Outlet

BOUNDARY CONDITIONS :

FLOW REGIME :

Option = Subsonic

END

MASS AND MOMENTUM :

Option = Static Pressure

Relative Pressure = DownPres

END

END

END

BOUNDARY: Top

Boundary Type = OPENING

Location = Top

BOUNDARY CONDITIONS :

FLOW REGIME :

Option = Subsonic

END

MASS AND MOMENTUM :

Option = Static Pressure for Entrainment

Relative Pressure = 0 [Pa]

END

TURBULENCE:

Option = Zero Gradient

```

        END
    END
    FLUID: Air at 25 C
        BOUNDARY CONDITIONS :
            VOLUME FRACTION :
                Option = Value
                Volume Fraction = 1
            END
        END
    END
    FLUID: soil
        BOUNDARY CONDITIONS :
            VOLUME FRACTION :
                Option = Value
                Volume Fraction = 0
            END
        END
    END
    BOUNDARY: bottom
        Boundary Type = WALL
        Location = bottom
        BOUNDARY CONDITIONS :
            WALL INFLUENCE ON FLOW :
                Option = Free Slip
            END
        END
    END
    BOUNDARY: front
        Boundary Type = WALL
        Location = front
        BOUNDARY CONDITIONS :
            WALL INFLUENCE ON FLOW :
                Option = Free Slip
            END
        END
    END
    BOUNDARY: inflow
        Boundary Type = INLET
        Location = inflow
        BOUNDARY CONDITIONS :
            FLOW REGIME :

```

```

        Option = Subsonic
    END
    MASS AND MOMENTUM :
        Normal Speed = V
        Option = Normal Speed
    END
    TURBULENCE:
        Eddy Length Scale = UpH
        Fractional Intensity = 0.05
        Option = Intensity and Length Scale
    END
END
FLUID: Air at 25 C
    BOUNDARY CONDITIONS :
        VOLUME FRACTION :
            Option = Value
            Volume Fraction = UpVFAir
        END
    END
END
FLUID: soil
    BOUNDARY CONDITIONS :
        VOLUME FRACTION :
            Option = Value
            Volume Fraction = UpVFWater
        END
    END
END
BOUNDARY: klin
    Boundary Type = WALL
    Location = klin
    BOUNDARY CONDITIONS :
        WALL INFLUENCE ON FLOW :
            Option = No Slip
        END
        WALL ROUGHNESS :
            Option = Smooth Wall
        END
    END
END
DOMAIN MODELS :
```



```

BUOYANCY MODEL :
    Buoyancy Reference Density = 1.185 [kg m^-3]
    Gravity X Component = 0 [m s^-2]
    Gravity Y Component = - g
    Gravity Z Component = 0 [m s^-2]
    Option = Buoyant
    BUOYANCY REFERENCE LOCATION :
        Option = Automatic
    END
END
DOMAIN MOTION :
    Option = Stationary
END
MESH DEFORMATION :
    Option = None
END
REFERENCE PRESSURE :
    Reference Pressure = 1 [atm]
END
END
FLUID: Air at 25 C
    FLUID MODELS :
        FLUID BUOYANCY MODEL :
            Option = Density Difference
        END
        MORPHOLOGY:
            Option = Continuous Fluid
        END
    END
END
FLUID: soil
    FLUID MODELS :
        FLUID BUOYANCY MODEL :
            Option = Density Difference
        END
        MORPHOLOGY:
            Option = Continuous Fluid
        END
    END
END
FLUID MODELS :
    COMBUSTION MODEL :

```

```

        Option = None
    END
    HEAT TRANSFER MODEL :
        Fluid Temperature = 25 [C]
        Homogeneous Model = True
        Option = Isothermal
    END
    THERMAL RADIATION MODEL :
        Option = None
    END
    TURBULENCE MODEL :
        Option = k epsilon
        BUOYANCY TURBULENCE :
            Option = None
        END
    END
    TURBULENT WALL FUNCTIONS :
        Option = Scalable
    END
END
FLUID PAIR : Air at 25 C | soil
    INTERPHASE TRANSFER MODEL :
        Option = None
    END
    MASS TRANSFER :
        Option = None
    END
    SURFACE TENSION MODEL :
        Option = None
    END
END
MULTIPHASE MODELS :
    Homogeneous Model = On
    FREE SURFACE MODEL :
        Option = Standard
    END
END
INITIALISATION:
    Option = Automatic
    FLUID: Air at 25 C
        INITIAL CONDITIONS :

```

```

        VOLUME FRACTION :
            Option = Automatic with Value
            Volume Fraction = UpVFAir
        END
    END
END
FLUID: soil
    INITIAL CONDITIONS :
        VOLUME FRACTION :
            Option = Automatic with Value
            Volume Fraction = UpVFWater
        END
    END
END
INITIAL CONDITIONS :
    Velocity Type = Cartesian
    CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS :
        Option = Automatic with Value
        U = V
        V = 0 [m s-1]
        W = 0 [m s-1]
    END
    EPSILON:
        Option = Automatic
    END
    K:
        Option = Automatic
    END
    STATIC PRESSURE :
        Option = Automatic with Value
        Relative Pressure = UpPres
    END
END
END
MESH ADAPTION :
    Activate Adaption = On
    Domain Name = Default Domain
    Save Intermediate Files = Off
    Subdomain List = B28
    ADAPTION ADVANCED OPTIONS :
        Adapt To Geometry = Off
        Node Allocation Parameter = 1.6

```

```

        Number of Adaption Levels = 2
    END
    ADAPTION CONVERGENCE CRITERIA :
        Adaption Target Residual = 0.001
        Maximum Iterations per Step = 100
        Option = RMS Norm for Residuals
    END
    ADAPTION CRITERIA :
        Maximum Number of Adaption Steps = 2
        Node Factor = 4
        Option = Multiple of Initial Mesh
        Variables List = Air at 25 C.Volume Fraction
    END
    ADAPTION METHOD :
        Minimum Edge Length = 0.0
        Option = Solution Variation
    END
END
OUTPUT CONTROL :
    RESULTS:
        File Compression Level = Default
        Option = Standard
    END
END
SIMULATION TYPE :
    Option = Steady State
    EXTERNAL SOLVER COUPLING :
        Option = None
    END
END
SOLUTION UNITS :
    Angle Units = [rad]
    Length Units = [m]
    Mass Units = [kg]
    Solid Angle Units = [sr]
    Temperature Units = [K]
    Time Units = [s]
END
SOLVER CONTROL :
    ADVECTION SCHEME :
        Option = High Resolution
    END

```

```

CONVERGENCE CONTROL :
    Maximum Number of Iterations = 200
    Physical Timescale = 0.25 [s]
    Timescale Control = Physical Timescale
END
CONVERGENCE CRITERIA :
    Residual Target = 1.E - 4
    Residual Type = RMS
END
DYNAMIC MODEL CONTROL :
    Global Dynamic Model Control = On
END
MULTIPHASE CONTROL :
    Volume Fraction Coupling = Coupled
END
END
END

LIBRARY:
CEL:
    EXPRESSIONS:
        DenH = 13000 [kg m^-3]
        DownH = 0.37 [m]
        DownPres = DenH*g*DownVFWater*(DownH - y)
        DownVFAir = step((y - DownH)/1[m])
        DownVFWater = 1 - DownVFAir
        G = 269.5 [Pa]
        K = 160 [Pa*s]
        LowerS = 0.001 [s^-1]
        UpH = 0.37 [m]
        UpPres = DenH*g*UpVFWater*(UpH - y)
        UpVFAir = step((y - UpH)/1[m])
        UpVFWater = 1 - UpVFAir
        UpperS = 1E10 [s^-1]
        V = 0.4 [m s^-1]
    END
END
MATERIAL: Air at 25 C
    Material Description = Air at 25 C and 1 atm (dry)
    Material Group = Air Data, Constant Property Gases
    Option = Pure Substance
    Thermodynamic State = Gas

```

PROPERTIES:

Option = General Material

Thermal Expansivity = 0.003356 [K⁻¹]

ABSORPTION COEFFICIENT :

Absorption Coefficient = 0.01 [m⁻¹]

Option = Value

END

DYNAMIC VISCOSITY :

Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m⁻¹ s⁻¹]

Option = Value

END

EQUATION OF STATE :

Density = 1.185 [kg m⁻³]Molar Mass = 28.96 [kg kmol⁻¹]

Option = Value

END

REFERENCE STATE :

Option = Specified Point

Reference Pressure = 1 [atm]

Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

REFRACTIVE INDEX :

Option = Value

Refractive Index = 1.0 [m m⁻¹]

END

SCATTERING COEFFICIENT :

Option = Value

Scattering Coefficient = 0.0 [m⁻¹]

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY :

Option = Value

Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg⁻¹ K⁻¹]

Specific Heat Type = Constant Pressure

END

THERMAL CONDUCTIVITY :

Option = Value

Thermal Conductivity = 2.61E-02 [W m⁻¹ K⁻¹]

END

END

END

```

MATERIAL: soil
    Material Group = User
    Option = Pure Substance
    Thermodynamic State = Liquid
    PROPERTIES:
        Option = General Material
        DYNAMIC VISCOSITY :
            Dynamic Viscosity =  $G / (\min(\text{UpperS}, \max(\text{sstrnr}, \text{LowerS}))) + K$ 
            Option = Value
        END
        EQUATION OF STATE :
            Density = DenH
            Molar Mass = 1.0 [kg kmol-1]
            Option = Value
        END
        REFERENCE STATE :
            Option = Specified Point
            Reference Pressure = 1 [atm]
            Reference Temperature = 25 [C]
        END
        SPECIFIC HEAT CAPACITY :
            Option = Value
            Specific Heat Capacity = 0 [J kg-1 K-1]
            Specific Heat Type = Constant Pressure
        END
    END
END
END

```