

УДК 624.13;69:001.89;626/627;721/728

*О.М. Галінський, к.т.н. ДП НДІБВ,
О.В. Горда, к.т.н. КНУБіА, м. Київ*

ОСНОВНІ АСПЕКТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЛАШТУВАННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЕКРАНА ПІД СПОРУДОЮ

АНОТАЦІЯ

Стаття присвячена питанням розробки технології локалізації ґрунтів, забруднених техногенними стоками під сховищами токсичних або радіоактивних відходів в разі відсутності під ними водотривкого шару ґрунту на практично досяжній глибині.

Запропонована технологія заснована на способі горизонтально-направленого буріння (ГНБ) свердловин, які об'єднуються між собою ґрунторозробним робочим органом із заповненням порожнини, що утворюється, протифільтраційним матеріалом (ПФМ) і створенням, таким чином, горизонтального протифільтраційного екрана (ГПЕ) під спорудою.

У статті розглянуто основні аспекти існуючих теорій взаємодії робочих органів з ґрунтовым середовищем, включають як різання, так і проникнення твердого тіла в ґрунтове середовище. Поставлена задача створення математичної моделі влаштування ГПЕ на основі емпірико-аналітичних досліджень. Запропонована базова модель для визначення сили опору переміщенню робочого органу при влаштуванні ГПЕ.

Ключові слова: локалізація ґрунтів, горизонтально-направлене буріння, протифільтраційний екран.

Екологічна безпека будівель, споруд та обслуговуючих їх систем останнім часом викликає широкий інтерес у фахівців і набула особливої актуальності в силу об'єктивної необхідності, пов'язаної із зростанням шкідливого впливу діяльності людини на навколишнє середовище.

Необхідність забезпечувати будівлі і споруди екологічним захистом також пов'язана із підписанням Кіотського протоколу, підписаного усіма великими промисловими державами (за винятком США). Законодавство України регламентує загальні вимоги до екологічної безпеки в будівництві.

Стосовно галузі будівництва будівля, споруда та їх інженерні системи мають бути спроектовані так, щоб при їх зведенні та експлуатації не виникало загрози нанесення шкоди екології навколишнього середовища протягом всього строку служби об'єкта.

Проблема надійної ізоляції джерел забруднення навколишнього середовища актуальна для всіх промислових підприємств. Так, в результаті виробничої діяльності відбувається накопичення промислових відходів, які часто є джерелом техногенного забруднення ґрунтів за рахунок інфільтрації води, насиченої шкідливими речовинами.

Ряд підземних споруд або окремих конструкцій в силу свого призначення працюють у постійному контакті з водою, що, як правило, спричиняє на них негативний вплив. Однак цей вплив значно посилюється у випадку насичення ґрунтів водою зі шкідливими речовинами.

Це повною мірою відноситься і до постійних сховищ з токсичними чи радіоактивними відходами, до яких пред'являються підвищені вимоги щодо їх безпеки в цілому і герметичності гідроізоляції зокрема.

Незважаючи на посилену гідроізоляцію підземної частини таких сховищ під впливом як внутрішніх, так і зовнішніх чинників нерідко відбувається пошкодження гідроізоляції і виникнення фільтраційного потоку, який забруднює навколишні ґрунти і підземні води.

Порушена гідроізоляція, як правило, відновленню не підлягає через небезпеку порушення самого сховища під час ремонтно-відновлювальних робіт. Переміщення ж відходів в інше сховище пов'язано з небезпекою ще більшого забруднення навколишнього середовища під час їх транспортування та вантажно-розвантажувальних робіт.

Локалізація фільтраційного потоку забрудненої води, що утворився під сховищем, можлива шляхом влаштування додаткової гідроізоляції. Досить ефективним способом локалізації забруднення може бути влаштування по периметру сховища досконалої протифільтраційної діафрагми, яка виконується, наприклад, способом "стіна в ґрунті" [1]. Техніко-економічна доцільність застосування "стіни в ґрунті" визначається наявністю водотривкого шару ґрунту на практично досяжній глибині і співвідношенням площі локалізації до глибини закладення підшви діафрагми. Як пра-

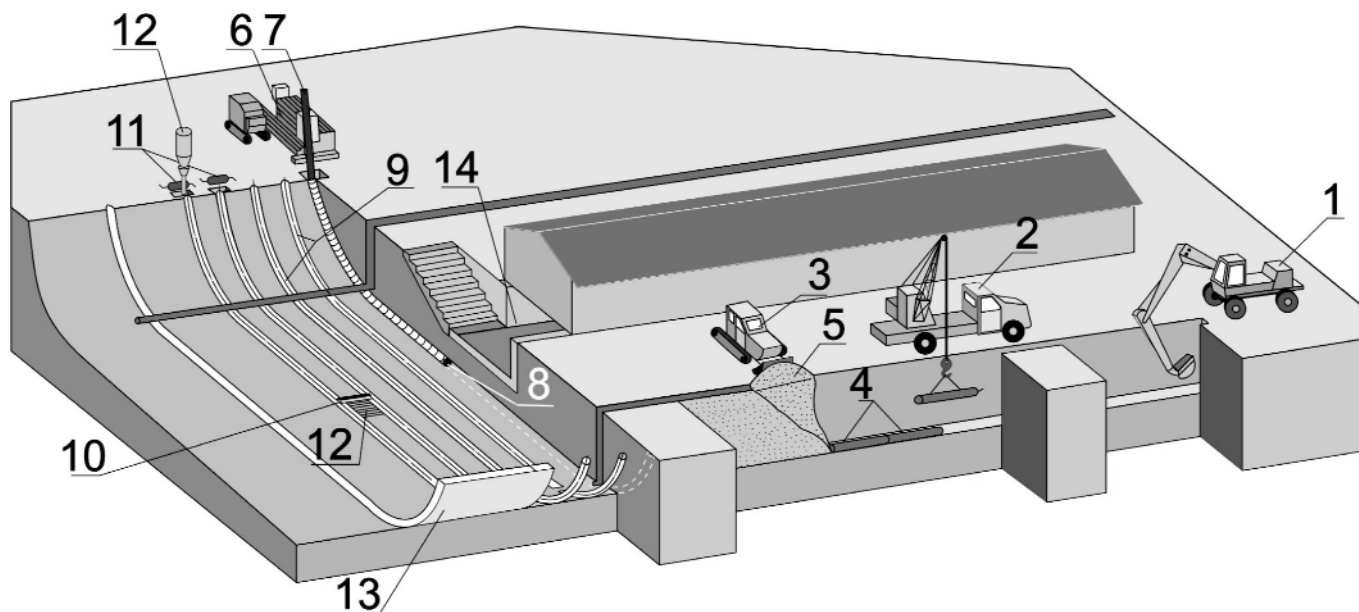


Рис.1. Технологія влаштування ГПЕ під спорудою

1 — екскаватор, 2 — автокран, 3 — бульдозер, 4 — дренажна труба, 5 — щебінь для дренажу, 6 — установка ГНБ, 7 — бурова штанга, 8 — бурова головка, 9 — горизонтальна свердловина, 10 — робочий орган, 11 — лебідка, 12 — ПФМ, 13 — ГПЕ, 14 — сховище

вило, глибина розташування водоупору під сховищем не повинна перевищувати 30 м.

Якщо ж водотривкий шар ґрунту знаходиться на більшій глибині або взагалі відсутній, виникає необхідність у його створенні шляхом влаштування, наприклад, штучного протифільтраційного екрана.

Теоретично такий екран можна виконати з похилих діафрагм, що перетинаються під сховищем, а також з окремих паралельних горизонтальних штолень або свердловин, що перетинаються, і які заповнюються протифільтраційним матеріалом. При цьому між окремими елементами екрана не повинно бути пропусків, що технічно, починаючи з певної глибини, здійснити практично неможливо при використанні відомих способів влаштування похилих діафрагм або паль, що перетинаються.

Відомо, що проходка окремих не пов'язаних між собою вертикальних або горизонтальних свердловин в ґрунтах без скельних включень не представляє особливих труднощів і освоєна спеціалізованими будівельними організаціями, які займаються проколами, що використовуються для прокладки інженерних комунікацій під різними перешкодами [2].

В останні роки на озброєнні будівельників з'явилися бурові установки для проходки горизонтальних свердловин з денної поверхні спосо-

бом горизонтально-направленого буріння (ГНБ). Для утримання стінок цих свердловин від обвалення застосовують прохідницький розчин (глинистий або полімерний), аналогічний тому, який використовується при будівництві споруд способом "стіна в ґрунті". Це технологічно зближує обидва способи і дозволяє застосовувати їх у складних інженерно-геологічних і гідрогеологічних умовах.

Значний досвід застосування технології влаштування протифільтраційних діафрагм способом "стіна в ґрунті", накопичений в НДІ будівельного виробництва, та аналіз технології влаштування горизонтальних свердловин способом ГНБ дозволило запропонувати нову технологію влаштування підземного екрана (рис.1). Спосіб, за яким утворюється горизонтальний протифільтраційний екран (ГПЕ) під спорудою, включає буріння паралельних направляючих горизонтальних свердловин, розробку ґрунту між свердловинами ґрунторозробним робочим органом зі створенням порожнини і заповненням цієї порожнини протифільтраційним матеріалом (ПФМ) [3,4,5].

Для реалізації технології, що пропонується, необхідно вирішити ряд завдань, серед яких проведення комплексних досліджень із визначення технологічних параметрів утворення порожнини у ґрунті, підбору протифільтраційного матеріалу та

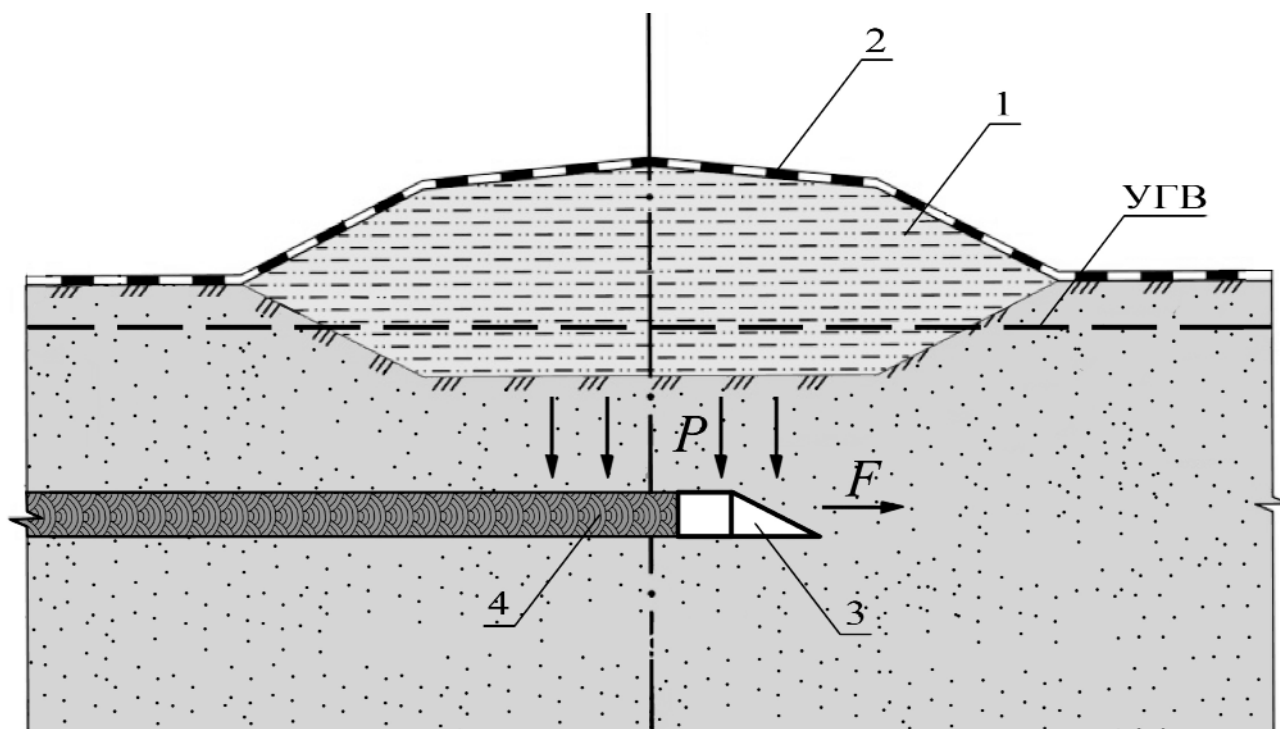


Рис. 2. Схема влаштування ГПЕ

P — вертикальний тиск; F — зусилля переміщення робочого органу (ножа)
 1 — сховище відходів; 2 — надземна гідроізоляція; 3 — робочий орган (ніж); 4 — ГПЕ

визначення можливості і параметрів заповнення порожнини ПФМ.

Крім визначення технологічних параметрів влаштування ГПЕ експериментальним шляхом, стоїть завдання визначення взаємозв'язку між цими параметрами і створення математичної моделі, яка описує процес влаштування горизонтального протифільтраційного екрана під спорудою.

І якщо дослідження технологічних параметрів влаштування ГПЕ із застосуванням глино-цементно-піщаних і полімерних заповнювачів порожнини в піску були проведені як на малих моделях [6, 7, 8], так і на великому експериментальному стенді [9], то питання теоретичного обґрунтування процесу влаштування ГПЕ залишаються відкритими.

У процесі створення горизонтального екрана, що включає утворення порожнини протягуванням ґрунторозробного робочого органу (ножа) і заповнення порожнини ПФМ необхідно враховувати вплив як статичних, так і динамічних навантажень.

Статичні навантаження визначаються поточними характеристиками середовища, (в даному випадку піщаного ґрунту), у тому числі і тиском ґрунту і споруди, розташованих над екраном, а динамічні навантаження визначають параметри переміщення робочого органу в середовищі. (Рис.2)

Процес утворення порожнини при влаштуванні ГПЕ шляхом переміщення робочого органу — ножа в замкнутому середовищі, в якості якої розглядається піщаний ґрунт, являє собою систему, що складається з двох компонентів з різними фізико-механічними властивостями і сукупність складних, в більшості випадків, нелінійних процесів.

З метою дослідження можливості фізичної реалізації технології, що пропонується, визначення умов і параметрів її реалізації, створення її математичної моделі необхідно провести всебічний структурний і функціональний аналіз системи "робочий орган-середовище", приділивши особливу увагу динамічним процесам, оскільки більшість існуючих досліджень присвячено статичі сипких середовищ.

В задачах дослідження процесу взаємодії робочого органу і середовища виділяють два основних підходи: аналітичний та емпірико-теоретичний.

Існуючі теорії, які розглядають процеси взаємодії робочих органів з середовищем, можна умовно поділити на такі групи:

- теорії, що розглядають процес різання ґрунту;
- теорії дослідження проникнення твердого тіла в середовище.

Більшість досліджень і робіт відноситься до першої групи, причому, в основному розглядаєть-

ся процес відвального різання. Концептуальні положення цього процесу ґрунтуються на результатах експериментальних досліджень і залежностях емпіричного характеру, які висвітлені в роботах В. П. Горячкіна, Н.Т. Домбровського, А. Н. Зеленина, А. Д. Даліна, В. Рат'є, Р. Кюна, Р. Шилда.

Теорії, що базуються на ряді положень статистики сипких середовищ з урахуванням додаткових умов граничної рівноваги, засновані на дослідженнях Ю. А. Ветрова, К. А. Артем'єва, В.І. Баловнева [10, 11, 12].

Характерним для цих підходів є відсутність урахування властивостей деформованого середовища. Значення діючого опору на робочому органі визначаються з допомогою емпіричних формул та залежностей, в яких використовуються тільки основні параметри та співвідношення розмірів робочих органів машин, питомі показники ґрунту та умови його розробки. Це обумовлено тим, що отримання суто аналітичних залежностей в області різання ґрунтів ускладнюється недостатньою вивченістю процесу деформації і руйнування ґрунтів.

Слід зазначити теорії, які ґрунтуються на властивостях деформованого середовища, що пластично стискається, динаміка взаємодій з яким описується замкненою системою рівнянь (аналітичний підхід). Однак жодна з теорій пружності, міцності або механіки суцільного середовища не розкриває повністю суті процесу руйнування ґрунтів під дією зовнішніх навантажень.

Процеси деформації ґрунту при різанні і копанні розглядаються в наукових працях Д. І. Федорова, В. А. Недорезова. Існуючі результати з механіки сипких середовищ викладені в монографіях Вялова і Клейна. Роботи В. О. Соколовського [13] (в тій же області) мали своєю метою побудову загального методу, який дає змогу розглядати задачі про граничну рівновагу також і для зв'язаного середовища, а з іншого боку, отримання методу, що дозволяє досить просто вирішувати різні задачі про напружений стан ідеально сипкого матеріалу.

При отриманні аналітичної залежності для визначення опору ґрунту різанню необхідно врахувати цілий ряд чинників, що впливають на його величину. Не завжди можливе визначення цих факторів також аналітичним шляхом. Найчастіше їх значення визначаються емпірично, тому велика роль відводиться експериментальним та експериментально теоретичним методам вивчення проникнення твердого тіла в середовище

(Л. Ейлер, Ж. Понселе, А. Резаль, Е. І. Забудський, В. Р. Березанцев).

Математичне моделювання процесів ущільнення ґрунтів ґрунтується на ключових моментах теорії пластичності. Ґрунти при цьому розглядаються як пружно-в'язко-пластичні середовища, тим самим враховується наявність як зворотної, так і незворотної частин деформації, а також вплив фактора часу і його похідних — швидкості прикладання навантаження і швидкості деформації.

Для реалізації поставленої задачі із влаштування ГПЕ необхідно провести всебічний аналіз процесів, що відбуваються в самому ґрунті і при взаємодії з ним робочого органу з метою виявлення найбільш істотних факторів і параметрів, а також визначити базовий підхід, який дозволить отримати оцінку параметрів технології, що пропонується. Відповідно до поставленої основної задачі, структурна схема процесу дослідження технології, що пропонується та факторів, що впливають на процес, представлена на рис. 3.

У зв'язку зі складністю протікання реальних процесів, кожна теорія спирається на певні спрощення і допущення. Класична механіка ґрунтів заснована на ряді наступних допущень:

а) ґрунт деформується як квазіоднорідне пружне тіло, якщо напруження в скелеті ґрунту не перевищують його структурну міцність;

б) вода і газ в порах є нестискальними і не роблять істотного впливу на процес деформування ґрунту;

г) стисливість мінеральних часток ґрунту надто мала;

д) деформація ґрунту під навантаженням обумовлена, в основному, перепакуванням після руйнування структурних зв'язків, що приводить до зміни об'єму пор.

У практичних розрахунках для ґрунтів і сипких середовищ в умовах складного напруженого стану приймають дві основні умови (теорії):

– умова Кулона-Мора, згідно з якою граничний стан настає при окремому співвідношенні дотичної і нормальної напружень, які діють в одній площині;

– умова Мізеса — Шлейхера, згідно з якою граничний стан настає при певному співвідношенні інтенсивності дотичних напружень і середнього нормального напруження.

Історично склалося так, що слідуючи Кулону, ці умови визначають граничну рівновагу, знаходження граничних навантажень, при досягненні яких

відбувається втрата рівноваги (втрата стійкості) середовища. По суті, вони визначають умови текучості ідеально жорстко-пластичного матеріалу, а граничні навантаження розуміються як навантаження, при досягненні яких така текучість стає можливою. Критерій текучості Кулона-Мора записується наступним чином:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2} = c \cdot \cos(\varphi) - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \cdot \sin(\varphi)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – компоненти напруги, φ – кут внутрішнього тертя сипучого матеріалу, c – зчеплення матеріалу.

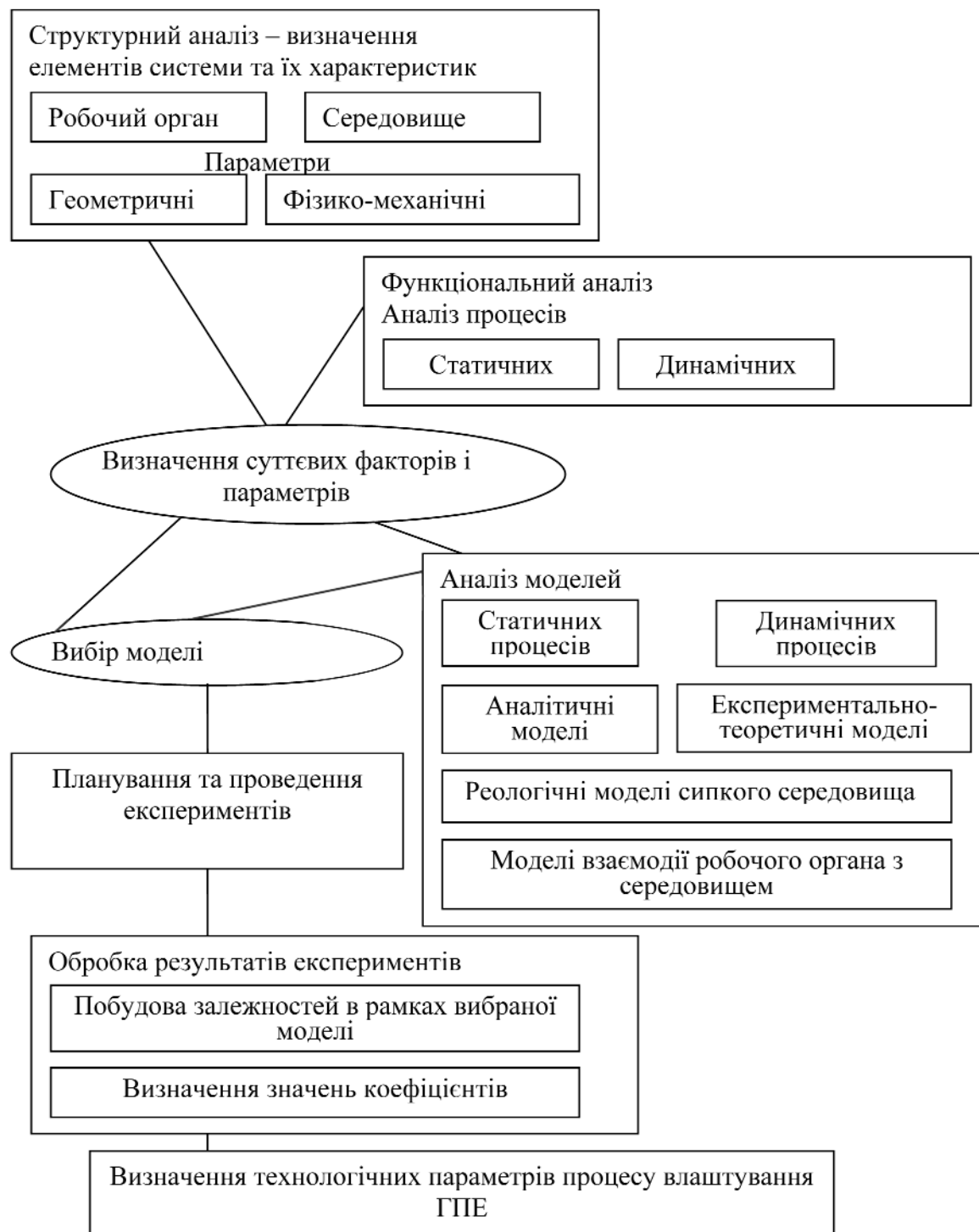


Рис. 3. Структурна схема дослідження технології влаштування ГПЕ

Диференціальні рівняння рівноваги суцільного середовища при плоскій деформації мають вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0. \end{cases}$$

і разом з критерієм текучості і граничними умовами складають математичну модель пластичної текучості сипкого середовища.

Спроба врахування пружних властивостей матеріалу призводить до рівнянь типу Прандтля-Рейса в теорії ідеальної пластичності [14]. Тобто, швидкості повних деформацій починають залежати не тільки від напруження, але і від їх приватних похідних по часу, що викликає значні математичні труднощі, як при аналізі роздільної системи рівнянь, так і при вирішенні конкретних завдань. Крайова задача на основі теорії пластичності Прандтля-Рейса описується співвідношеннями:

$$e'_{ij} = \varepsilon'_{ij} - \frac{\Theta'}{3}, \quad \Theta' = \text{div} \bar{V}, \quad \varepsilon'_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$$

де ε_{ij} — компоненти тензора деформації, e_{ij} — компоненти девіатора деформації, Θ — об'ємна деформація.

Основною умовою для застосування цієї моделі є нерозривність середовища. Рівняння Прандтля-Рейса спільно з рівняннями руху, законом Гука і умовою текучості Мізеса складають повну систему рівнянь, що описує поведінку ідеального пружно-пластичного матеріалу.

У зв'язку зі складністю визначення крайових умов практичне використання цих моделей утруднене [15]. При цьому, необхідність виконання великої кількості обчислень для знаходження рішень з використанням чисельних методів може давати значні похибки.

Як відзначається в роботах з механіки суцільного середовища, область їх застосування точно не встановлена. Застосовувати ці моделі для динамічних задач досить важко в силу необхідності врахування деформацій у різних точках тіла і залежності деформації від часу, тоді як динамічний функціонал пластичності вивчено не повністю навіть для одновимірного процесу, тобто при простій деформації.

В основі емпіричного підходу лежить припу-

щення, що сила опору середовища визначається у вигляді суми трьох сил:

$$F = F_1 + F_2 + F_3,$$

де F_1 — сила динамічного опору, викликана інерцією частинок середовища, приймається пропорційною квадрату швидкості проникнення тіла у середовище, F_2 — сила в'язкості середовища, що виникає за рахунок подолання тертя між частинками середовища, F_3 — сила статичного опору, яка істотно впливає на результат і величина якої не залежить від швидкості руху тіла [16].

Таким чином, силу опору середовища можна представити у вигляді рівняння:

$$F = AV^2 + BV + C,$$

де A, B, C — позитивні константи, що залежать від властивостей середовища і форми тіла, що рухається в ньому, V — швидкість переміщення робочого органу.

Враховуючи зручність для практичного застосування фізико-механічні характеристики середовища, що описують опір інтенсивному динамічному навантаженню, можна запропонувати в якості базової моделі вираз для визначення сили опору:

$$F = S \left(a_0 + \sum_{i=1}^n a_i V^i + \sum_{j=1}^k b_j \dot{V}^j \right),$$

де S — площа міделя, a_i, b_j — коефіцієнти, які характеризують властивості середовища і які враховують форму робочого органу, $\dot{V}$ — прискорення робочого органу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Технология и механизация строительства противофильтрационных завес и монолитных несущих стен способом "стена в грунте"*, РСН 316. — К, НИИСП Госстроя УССР, 1989. -48с.
2. *Руководство по проходке горизонтальных скважин при бестраншейной прокладке инженерных коммуникаций //ЦНИИОМГ^П Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1982.-82 с.*
3. *Спосіб улаштування екрана під спорудою, /Деклараційний патент на винахід № 35065 А від 15.03.2001, бюл.№2 /.*
4. *Спосіб улаштування екрана під спорудою, /Патент на винахід № 95383 від 25.07.2011, бюл.№14.*
5. *Спосіб улаштування екрана під спорудою, /Патент на корисну модель № 65550 від 12.12.2011, бюл.№23.*
6. А.М.Чернухин, А.М.Галинский *Исследование*

процесса образования полости для устройства подземного экрана под сооружением. Будівельне виробництво, Київ, 2000, №41, с.37–40.

7. О.М.Чернухін, О.М.Галінський, І.О.Мандзюк Дослідження процесу укладки тампонажних матеріалів у порожнину для створення горизонтального екрана під спорудою. Нові технології в будівництві, Київ, 2002, №1(3), с.44–49.

8. О.М.Чернухін, О.М.Галінський, Лабораторні дослідження процесу втягування полімерної плівки у порожнину під тиском до 0,2 МПа для створення горизонтального екрана під спорудою. Нові технології в будівництві, Київ, 2003, №2(6), с. 63–68.

9. A. Galinskiy, Research of technology of construction of horizontal impervious screen under the existing structures. Conference proceedings XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE 2014) 9-11 September 2014, Vienna, Austria, volume 2 Paper No.1213–1219

10. К. А. Артемьев Теория резания грунтов землеройно-транспортными машинами. — Омск: ОмПИ, 1989. — 80 с.

11. В. Л. Баладинский Динамическое разрушение грунтов рабочими органами землеройных машин: Дис...д-ра техн. наук. — Киев, 1979. — 396 с.

12. Ю. А Ветров. Машины для земляных работ. — Киев: Вища школа, 1981. — 346 с.

13. В. В. Соколовский, Теория пластичности, 3 изд., М., 1969;

14. В. Т. Койтер, Общие теоремы теории упругопластических сред, пер. с англ., М., 1901.

15. Н.Н. Белов, Д.Г. Копаница, Н.Т. Югов, Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов. Том.2. Введение в механику сплошной среды. Уравнения гиперболического типа. — Томск: STT, 2008. — 332 с.

16. Математическое моделирование рабочих процессов дорожных и строительных машин: имитационные и адаптивные модели: монография / А. М. Завьялов и др. — Омск: СибАДИ, 2012. — 411 с.

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена вопросам разработки технологии локализации грунтов, загрязненных техногенными стоками под хранилищами токсичных или радиоактивных отходов в случае отсутствия

под ними водоупорного слоя грунта на практически достигаемой глубине.

Предложенная технология основана на способе горизонтально-направленного бурения (ГНБ) скважин, которые объединяются между собой грунторазрабатывающим рабочим органом с заполнением образовавшейся полости противифльтрационным материалом (ПФМ) и созданием, таким образом, горизонтального противифльтрационного экрана (ГПЭ) под сооружением.

В статье рассмотрены основные аспекты существующих теорий взаимодействия рабочих органов с грунтовой средой, включающих как резание, так и проникновения твердого тела в грунтовую среду. Поставлена задача создания математической модели устройства ГПЭ на основе эмпирико-аналитических исследований. Предложена базовая модель для определения силы сопротивления перемещению рабочего органа при устройстве ГПЭ.

Ключевые слова: локазация почв, горизонтально-направленное бурение, противифльтрационный экран

ANNOTATION

The article is devoted to the problems of development of technology of soils localization contaminated by anthropogenic sinks under the storage of toxic or radioactive waste in the absence of impervious soil layer at almost attainable depth.

The proposed technology is based on the method of horizontal directional drilling (HDD) wells, which are combined with each other by soil development working body with filling of the cavity with impervious material (IM) and so creation of horizontal impervious screen (HIS) under construction.

The article describes the main aspects of the existing theories of interaction of working bodies with soils, including both cutting and penetration of a rigid body in soils. The task of creating of mathematical model of the HIS development based on the empirical and analytical studies was set. A basic model to determine the strength of movement resistance of the body for HIS development was proposed.

Keywords: lokazation of soils, the horizontally directed drilling, the antifiltrational screen