

Моделювання робочих процесів машин

УДК 624.132.3

М.П. Кузьмінець, к.т.н., докторант (КНУБА),
начальник науково-дослідного відділу НДТЦ «Ротор», Київ

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТАРНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СПЕЦІАЛЬНИХ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН З СЕРЕДОВИЩЕМ*

АНОТАЦІЯ. Розроблено теоретичні передумови взаємодії елементарних робочих органів землерийних машин з пластичним середовищем на прикладі занурення штампа в ґрунт шляхом оцінки напружено-деформованого стану середовища при комбінованій дії процесів ущільнення та руйнування. Побудовано поля напружень та зона руйнування, керування якими дозволяє досягти мінімальної роботи руйнування.
Ключові слова: середовище, штамп, напружений стан, зона руйнування.

АННОТАЦИЯ. Разработаны теоретические предпосылки взаимодействия элементарных рабочих органов землеройных машин с пластической средой на примере погружения штампа в грунт путем оценки напряженно-деформированного состояния среды при комбинированном действии процессов уплотнения и разрушения. Построены поля напряжений и зона разрушения, управление которыми позволяет достичь минимальной работы разрушения.
Ключевые слова: среда, штамп, напряженное состояние, зона разрушения.

SUMMARY. A theoretical basis of elementary interaction of earth-moving machines working with plastic environments for example, dipping a stamp in the soil and by assessing the stress-strain state of the environment in the combined processes of sealing and demolition. Construct the stress field and zone of destruction, which allows management to achieve the minimum of damage.
Keywords: environment, stamp, stress, damage zone

Вступ

Останнім часом постала серйозна необхідність виконання наукових досліджень, спрямованих на створення більш досконалої теорії розрахунку взаємодії робочого обладнання (РО) землерийних машин (ЗМ) для капітального ремонту магістральних трубопроводів з середовищем у зв'язку зі специфікою виконуваних робіт. Це пов'язано з необхідністю створення та впровадження спеціальних технологічних комплексів машин, здатних працювати в специфічних умовах – виконувати земляні роботи в безпосередній близькості від магістрального трубопроводу, який під час робіт може перебувати під тиском.

Нині вирішення цього питання є надзвичайно актуальним.

На сьогодні близько 70% українських трубопровідних магістралей вичерпали свій

ресурс і потребують термінового капітального ремонту, що полягає у розкриванні діючого трубопроводу та заміні ізоляційного покриття труби на нове. Відремонтовані трубопровідні магістралі стануть для України і багатьох країн Європи гарантією стабільності, безперебійності та безпеки постачання нафти і газу для їх потреб.

Останнім часом виконано низку наукових робіт [1 - 5] із впровадження нової техніки (рис. 1), здатної працювати за новою технологією «без підйому труби та зупинки перекачування продукту». Однак до цього часу відсутня досконала, для вирішення зазначеного питання, наукова база вибору раціональних форм, параметрів РО та режимів їх роботи з причини відсутності теорії, здатної оцінити взаємодію специфічного обладнання за умов близько розташованого трубопроводу під тиском.

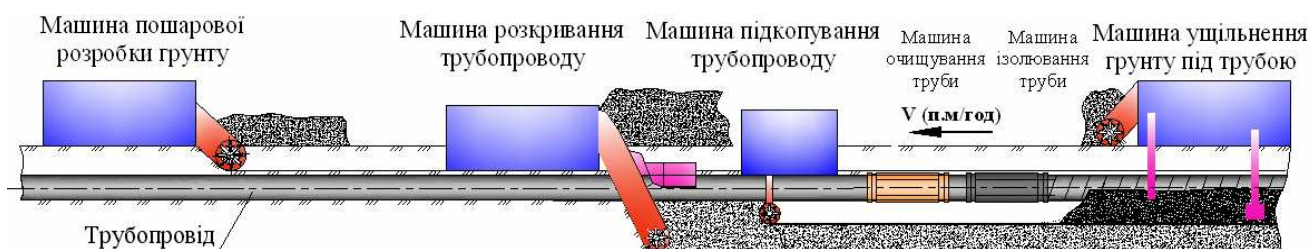


Рис. 1. Технологічна схема розташування землерийних машин в колоні під час капітального ремонту магістральних трубопроводів

Аналіз досліджень

Загальновідомо, що робота будь-яких землерийних машин обумовлюється двома основними процесами – руйнуванням та ущільненням робочого середовища. Класичні підходи полягають у розгляданні цих процесів окремо.

Відомо велику кількість теорій руйнування ґрунтових середовищ В.П.Горячкіна, А.М.Зеленіна, М.Г. Домбровського, Ю.О.Ветрова та ін., які базуються на одержаних, переважно експериментальним шляхом, функціональних залежностях, що встановлюють вплив окремих факторів на показники процесів різання та копання ґрунтів.

Окремо розглядаються процеси ущільнення ґрунту робочими органами машин для земляних робіт на основі теорій Герца – Беляєва, М.Я.Хархути, М.А.Цитовича.

Ущільненням ґрунтових фундаментів промислових споруд займалися К. Терцагі, М.М.Маслов, В.Г.Березанцев, В.А.Флорін та ін. В роботах В.В.Соколовського, Г.А.Генієва, М.І.Естріна, В.Й. Сівка розв'язано низку пружно-пластичних задач, переважно, для бетонних середовищ.

В роботах зазначених авторів розглядаються окремо лише процеси ущільнення, або ж руйнування. Проте відокремлено такі процеси не існують, а знаходяться завжди поруч, виходячи один з одного.

Зазначимо, що руйнування – це процес ущільнення з накопиченням деформацій та досягненням стану текучості (відокремлення), а ущільнення – це процес накопичення деформацій до межі текучості.

На практиці взаємодія двох процесів дуже часто зустрічається. Наприклад, під час роботи траншейного екскаватора в міжбалковому просторі перед ріжучим контуром виникає ядро ущільнення і на задній стінці виносної балки виникає ядро ущільнення. В результаті різання заважає ущільнення.

Під час ущільнення ґрунту під трубопроводом імовірно виникнення зони руйнування, у результаті чого переміщення ґрунту (особливо твердих включень) може пошкоджувати нове ізоляційне покриття.

Бувають випадки, коли один процес сприяє іншому [4, 5]. Ущільнення масиву підрізаного ґрунту під трубою провокує появи зон руйнування в нижній частині і масив руйнується без додаткової механічної розробки, що, в свою чергу, суттєво зменшує енергоємність процесу екскавації.

Проблема

Отже, процеси руйнування та ущільнення мають бути «ув'язані» між собою. Руйнуванню не повинно заважати ущільнення (заштибовка); ущільненню не повинно заважати руйнування (розущільнення), а по можливості сприяти одне одному. Однак, у класичних підходах розглядається лише взаємодія факторів у окремому процесі.

Наукова проблема полягає у відсутності теоретичної бази для оцінки взаємодії двох процесів – ущільнення і руйнування.

Створення передумов такої теорії дозволить встановити нові явища і керувати ними з метою визначення раціональних параметрів та режимів роботи РО ЗМ.

Крім того, під час досліджень взаємодії РО ЗМ з середовищем виникла важлива специфічна проблема – наявність близько розташованого об'єкту (трубопроводу під тиском), рис. 2.

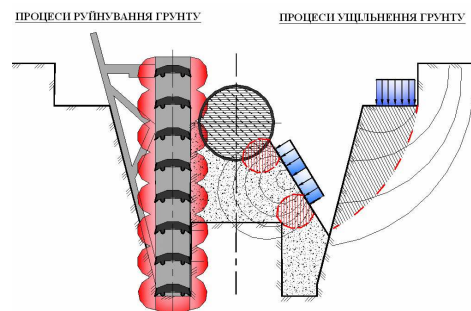


Рис. 2. Специфіка взаємодії РО ЗМ з середовищем в умовах капітального ремонту трубопроводів

Під час розкривання трубопроводу в зоні роботи обладнання виникає напружено-деформований стан (НДС), який має додатковий вплив на НДС трубопроводу. А з огляду на те, що труба пролежала 30...40 років в ґрунті з усіма впливаючими наслідками (корозія, старіння і власне перебування продукту під тиском), то створення додаткових напружень від роботи землерийних машин небажане, і має носити мінімально-допустимий характер.

Нажаль, жодна з класичних теорій різання, з огляду на специфіку виконання даних земляних робіт, не може відповісти на питання оцінки такого впливу.

Це ж стосується і процесів ущільнення ґрунту і оцінки створення додаткових напружень на саму трубу від руху машин та стійкості утвореної траншеї.

Тому постала задача розробити передумови теорії взаємодії РО с середовищем для отримання відповідей на поставлені завдання.

Очевидно, що проблему можна вирішити шляхом визначення напружено-деформо-

ваного стану робочого середовища машин, яка лежить в площині теорій міцності матеріалів. Адже технологічні процеси руйнування та ущільнення тісно пов'язані з деформуванням, обумовленим відповідними силовими діями. Отже, у таких випадках має місце НДС.

Мета дослідження розробити теоретичні основи взаємодії елементарних робочих органів (штамп, клин, різець, комбінація різців) землерийних машин з пластичним середовищем на прикладі занурення штампа в ґрунт шляхом оцінки НДС середовища при комбінованій дії процесів ущільнення та руйнування. Це дозволить побудувати поля напружень та зони руйнування, керувати ними для досягнення мінімальної роботи руйнування заданого об'єму ґрунту та підвищити ефективність застосування землерийного обладнання.

Задачі дослідження полягають у:

– розробленні методології теоретичних основ визначення НДС в ґрунтовому середовищі при дії на нього елементарних робочих органів землерийних машин (на прикладі штампа);

– встановленні характеру закономірностей виникнення і розповсюдження мікротріщин в ґрунті під дією штампа і знаходженні раціонального характеру такої взаємодії;

– формуванні методу оцінки раціональних геометричних параметрів елементарних РО ЗМ, виходячи з необхідності забезпечення мінімальної роботи руйнування середовища і максимальної глибини зони руйнування.

Виклад основного матеріалу

Постановка задачі дослідження. В пластичному матеріалі, яким моделюється ґрунт, будемо розглядати розподіл напружень, виникнення яких обумовлено взаємодією з матеріалом елементарних РО ЗМ різної форми: прямокутної, клиноподібної, круглої. Вважаємо, що контактні поверхні знаходяться в різних граничних умовах.

Спочатку розглянемо розподіл напружень в матеріалі, що займає напівплощину $y \leq 0$. В ній ділянка границі – вісь x довжиною $2a$ завантажена рівномірно розподіленим тиском $\sigma_y = -p$. Під дією цього навантаження буде здійснюватись ущільнення та випучування матеріалу вздовж вільної ділянки границі (рис. 3).

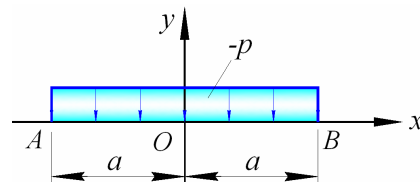


Рис. 3. Розрахункова схема

Розв'язок подібної елементарної задачі було вперше запропоновано Л.Прандтлем [6] в простому замкненому вигляді для випадків штампування отворів у металі та набула розвитку у дослідженнях сипучих середовищ В.В.Соколовським та бетонних сумішей Г.А.Генієвим, М.І.Естріним, В.Й. Сівком.

Особливістю даної роботи є розробка методології теоретичних передумов визначення НДС в ґрунтовому середовищі з урахуванням його особливостей.

Плоска пластична задача для області, що не обмежена контуром. Для плоского напруженого стану задачі (рис. 4) будемо мати рівняння рівноваги

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

і умову пластичності О. Мора

$$\frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2 = k^2, \quad (2)$$

де σ_x , σ_y , τ_{xy} – компоненти напружень (нормальні вздовж осі x і y та дотичні).

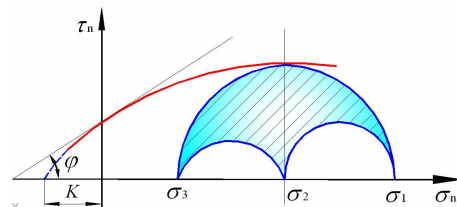


Рис. 4. Схема пластичного деформування матеріалу

Система рівнянь (1) і (2) має три компоненти напружень σ_x , σ_y , τ_{xy} . Отже, системі рівнянь пластичної рівноваги в компонентах напружень можна розглянути незалежно від компонент переміщення, а також і рівнянь деформацій в які вони входять.

На основі умови пластичності різниця головних нормальних напружень дорівнює постійній величині k , а їх сума може бути виражена через нову безрозмірну змінну χ наступним чином [7]

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) = k; \quad \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) = 2k\chi + \sigma_0,$$

причому σ_0 – довільна, але наперед вибрана постійна величина.

Застосовуючи тепер відомі формули перетворень

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x \\ \sigma_y \end{aligned} \right\} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \pm \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi, \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\varphi,$$

наведемо, відповідно до прийнятих позначень, компоненти напружень у вигляді

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x \\ \sigma_y \end{aligned} \right\} = \sigma_0 + k(2\chi \pm \cos 2\varphi), \quad \tau_{xy} = k \sin 2\varphi. \quad (4)$$

Таким чином, отримані вирази трьох компонентів напружень середовища через дві нові перемінні χ і φ , причому φ є кут між головним нормальним напруженням σ_1 і віссю x .

Через перемінні χ і φ стає можливим врахувати фізичні особливості поведінки ґрунтового середовища під навантаженням.

Після нескладних перетворень прийдемо до основної системи рівнянь, вперше отриманої М. Леві:

$$\frac{\partial \chi}{\partial y} - \sin 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \cos 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{\partial \chi}{\partial y} + \cos 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \sin 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Для розв'язку системи рівнянь (5) запишемо повні диференціали функцій χ і φ

$$d\chi = \frac{\partial \chi}{\partial x} dx + \frac{\partial \chi}{\partial y} dy; \quad d\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} dx + \frac{\partial \varphi}{\partial y} dy.$$

Розв'язуючи останні рівняння спільно з рівняннями (5) відносно часткових похідних χ і φ по координатах x і y , знайдемо

$$\frac{\partial \chi}{\partial x} = \frac{d\varphi dy + d\chi(\cos 2\varphi dx + \sin 2\varphi dy)}{\cos 2\varphi \left[dy - dx \operatorname{tg}\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \right] \left[dy - dx \operatorname{tg}\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) \right]} \quad (6)$$

і аналогічні вирази для решти похідних,

$$\left(\frac{\partial \chi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right).$$

Якщо в правих частинах цих рівностей знаменники перетворюються в нуль спільно з чисельниками, то вздовж лінії $y = y(x)$ значення похідних не однозначні і ці лінії називаються *характеристиками*.

Для отримання рівнянь характеристик слід одночасно чисельник і знаменник кожного дробу (6) прирівняти нулю.

Остаточно будемо мати дві системи рівнянь

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}\left(\varphi \pm \frac{\pi}{4}\right), \quad \chi \pm \varphi = \text{const}, \quad (7)$$

які визначають два сімейства характеристик (рис. 5): перше, що відповідає верхнім знакам '+' і друге, що відповідає нижнім знакам '-'.

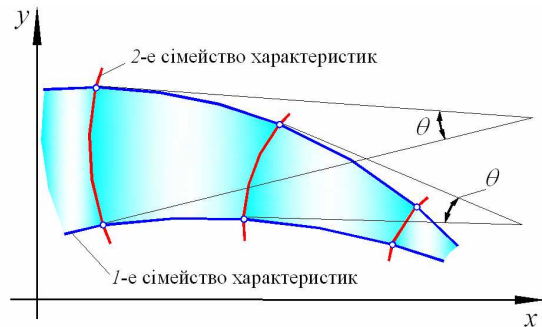


Рис. 5. Схема побудови ліній характеристик

Дотичні до характеристик утворюють з віссю x кут $\varphi \pm \pi/4$, тобто той же кут, що і лінії ковзання. Звідси безпосередньо випливає, що характеристики в площині x у є лініями ковзання.

З рівнянь характеристик можна зробити наступні висновки (теореми Генкі):

1. Вздовж характеристики зміна $(\sigma_x + \sigma_y)$ пропорційна куту повороту дуги, причому коефіцієнт пропорційності дорівнює $4k$.
2. Кут між дотичними до двох характеристик одного сімейства в точках перетину з характеристиками другого сімейства залишається постійним (рис. 5).

Щоб перейти до прямолінійної сітки характеристик позначимо

$$\alpha = \alpha(x, y) = \text{const}; \quad \beta = \beta(x, y) = \text{const},$$

- рівняння першого і другого сімейств характеристик. Прийmemo сітку характеристик за ортогональну систему криволінійних координат в площині $(x - y)$ і будемо розглядати x, y, χ, φ , як функції α і β .

В подальшому буде зручно користуватися новими змінними ξ і η , які пов'язано з χ і φ наступними рівностями

$$\xi = \chi + \varphi; \quad \eta = \chi - \varphi$$

$$\text{або } 2\chi = \xi + \eta; \quad 2\varphi = \xi - \eta. \quad (8)$$

Рівняння характеристик (7) можна тоді переписати в вигляді так званої канонічної системи рівнянь, яка містить дві довільні функції $\xi(\alpha)$ і $\eta(\beta)$, а саме:

$$\frac{\partial y}{\partial \beta} = \operatorname{tg}\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \frac{\partial x}{\partial \beta}; \quad \frac{\partial y}{\partial \alpha} = \operatorname{tg}\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) \frac{\partial x}{\partial \alpha};$$

$$\chi + \varphi = \xi = \xi(\alpha); \quad \chi - \varphi = \eta = \eta(\beta). \quad (9)$$

Функціональний перетворювач (визначник) рівнянь (9) має вигляд

$$\Delta = \frac{D(x, y)}{D(\alpha, \beta)} = \frac{2\partial x \partial x}{\cos 2\alpha \partial \alpha \partial \beta} = \frac{-2\partial y \partial y}{\cos 2\varphi \partial \alpha \partial \beta}. \quad (10)$$

Рівняння (9) переписується для змінних ξ і η , як

$$\frac{\partial y}{\partial \eta} = \operatorname{tg}\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \frac{\partial x}{\partial \eta}; \quad \frac{\partial y}{\partial \xi} = \operatorname{tg}\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) \frac{\partial x}{\partial \xi}, \quad (11)$$

а визначник перетворення (10) прийме вигляд

$$\Delta = \frac{D(x, y)}{D(\xi, \eta)} = \frac{2\partial x \partial x}{\cos 2\varphi \partial \xi \partial \eta} = \frac{-2\partial y \partial y}{\cos 2\varphi \partial \xi \partial \eta}. \quad (12)$$

Розв'язок канонічної системи рівнянь (11), для якої визначник перетворення Δ не дорівнює нулю, є розв'язком рівнянь (5).

Чисельний розв'язок рівнянь (11). Значення характеристик ґрунтового середовища χ, φ та координат x, y перетину ліній ковзання в точці k (її характеристики $\xi = \xi_k$) та l (її характеристики $\eta = \eta_l$) позначимо через $\chi_{k,l}, \varphi_{k,l}, x_{k,l}, y_{k,l}$. Їх зручно записати в таблицю, в якій характеристикам $\xi = \xi_k$ і $\eta = \eta_l$ відповідають k -й стовпчик і l -й рядок, а вузловій точці k, l відповідає клітинка, що розміщена в k -му стовпчику і l -му рядку (рис. 6).

$l \backslash k$	0	1	2	3	...	n
0						
1						
2						
3						
...						
n						

Рис. 6. Таблиця до розв'язку задачі

Припустимо, що частина таблиці заповнена і нам відомі значення $\chi_{k-1,l}, \varphi_{k-1,l}$,

$x_{k-1,l}, y_{k-1,l}; \chi_{k,l-1}, \varphi_{k,l-1}, x_{k,l-1}, y_{k,l-1}$ в точках $k-1, l$ і $k, l-1$. Покажемо, як визначити $\chi_{k,l}, \varphi_{k,l}, x_{k,l}, y_{k,l}$ в точках k, l і тим самим заповнити відповідну клітинку таблиці.

Для визначення величин $\chi_{k,l}$ і $\varphi_{k,l}$ існують формули

$$2\chi_{k,l} = \xi_k + \eta_l; \quad 2\varphi_{k,l} = \xi_k - \eta_l, \quad (13)$$

а для наближеного визначення величин $x_{k,l}$ і $y_{k,l}$ потрібно в рівняннях (11) замінити часткові похідні $\partial x/\partial \xi, \partial y/\partial \xi$ різницевиими відношеннями

$$\frac{x_{k,l} - x_{k-1,l}}{\Delta \xi}; \quad \frac{y_{k,l} - y_{k-1,l}}{\Delta \xi},$$

а часткові похідні $\partial x/\partial \eta, \partial y/\partial \eta$ різницевиими відношеннями:

$$\frac{x_{k,l} - x_{k,l-1}}{\Delta \eta}; \quad \frac{y_{k,l} - y_{k,l-1}}{\Delta \eta}.$$

Таким чином, замість диференціальних рівнянь отримаємо наступні різницеві рівняння

$$y_{k,l} - y_{k-1,l} = (x_{k,l} - x_{k-1,l}) \operatorname{tg}\left(\varphi_{k-1,l} - \frac{\pi}{4}\right);$$

$$y_{k,l} - y_{k,l-1} = (x_{k,l} - x_{k,l-1}) \operatorname{tg}\left(\varphi_{k,l-1} + \frac{\pi}{4}\right).$$

розв'язуючи які відносно $x_{k,l}, y_{k,l}$, знайдемо такі рекурентні формули

$$x_{k,l} = \frac{y_{k-1,l} - y_{k,l-1} + x_{k,l-1} \operatorname{tg}\left(\varphi_{k,l-1} + \frac{\pi}{4}\right)}{\operatorname{tg}\left(\varphi_{k,l-1} + \frac{\pi}{4}\right) - \operatorname{tg}\left(\varphi_{k-1,l} - \frac{\pi}{4}\right)} - \frac{x_{k-1,l} \operatorname{tg}\left(\varphi_{k-1,l} - \frac{\pi}{4}\right)}{\operatorname{tg}\left(\varphi_{k,l-1} + \frac{\pi}{4}\right) - \operatorname{tg}\left(\varphi_{k-1,l} - \frac{\pi}{4}\right)}; \quad (14)$$

$$y_{k,l} = y_{k-1,l} + (x_{k,l} - x_{k-1,l}) \operatorname{tg}\left(\varphi_{k-1,l} - \frac{\pi}{4}\right).$$

Задача про напружений стан в зоні дії плоского робочого органа на ґрунт. Загальна розрахункова схема вперше запропонована Л.О. Прандтлем [6] для випадків штампування отворів у метали. Однак, до цього часу не встановлені закономірності виникнення НДС і розповсюдження мікротріщин в ґрунті, що дозволило б оцінити взаємодію двох процесів – ущільнення і руйнування ґрунтового середовища для встановлення зони його гарантованого руйнування.

Розглянемо ліву частину $x \leq 0$ напівплощини відносно осі y , виходячи з симетрії задачі (рис. 7). В середовищі під робочим органом будемо мати три області: прямокутні трикутники $AM_{00}M_{01}, AM_{02}O$ і круговий сектор $AM_{01}M_{02}$.

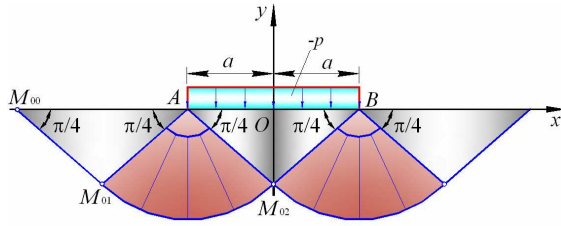


Рис. 7. Схема до розв'язку задачі про тиск штампа на ґрунтове середовище

В трикутниках $AM_{00}M_{01}$ та $AM_{02}O$ утворюється рівномірний напружений стан, який при $\sigma_0 = 0$ визначається

$$\chi = -\frac{1}{2}, \varphi = -\frac{\pi}{2} \text{ та } \chi = -\frac{1}{2}\left(\frac{p}{k} - 1\right), \varphi = 0,$$

а компоненти напружень мають вигляд

$$\sigma_x = -2k, \quad \sigma_y = \tau_{xy} = 0 \text{ і}$$

$$\sigma_x = -\rho + 2k, \quad \sigma_y = \tau_{xy} = -\rho, \tau_{xy} = 0.$$

Сітку характеристик в кожному з цих трикутників утворено двома сімействами паралельних прямих, спрямованих до осі x під кутами $\pi/4$.

В круговому секторі $AM_{01}M_{02}$ може бути використаний інтеграл

$$x = -\varphi + \xi; \quad y = x \operatorname{tg}(\varphi - \pi/4) + \psi(\varphi),$$

$$\frac{\partial y}{\partial \varphi} = \operatorname{tg}(\varphi + \pi/4) \frac{\partial x}{\partial \varphi},$$

отриманий С.А. Христиановичем [8].

Довільна функція $\psi(\varphi) = \operatorname{atg}(\varphi - \pi/4)$ знаходиться із умов $x = -a, y = 0$ в точці A . Остаточо мають місце рівності

$$x + \varphi = \xi_0, \quad \varphi = \frac{\pi}{4} \operatorname{arctg} \frac{y}{x + a},$$

а сітка характеристик складається з сімейства концентричних кіл з центром в точці A і пучка прямих, що проходять через ту ж точку.

Для того, щоб при такій комбінації розв'язків x і y були безперервні в усій області $AM_{00}M_{01}M_{02}O$, необхідно і достатньо, щоб величини ξ були постійні в кожній з областей $AM_{02}O$ і $AM_{01}M_{02}O$ та були рівні між собою. Отже, повинні мати місце рівності

$$-\frac{1}{2} - \frac{\pi}{2} = -\frac{\rho}{2k} + \frac{1}{2} = \xi_0.$$

На рис. 8 зображені ці залежності в площині $\xi\eta$. Вони відтворюють пластичний напружений стан ґрунтового середовища. Точки в площині $\xi\eta$ позначаються буквами μ_{ij} . Значення ζ, η, x, φ в точці μ_{ij} позна-

чаються через $\xi_{ij}, \eta_{ij}, x_{ij}, \varphi_{ij}$. Трикутникам $AM_{00}M_{01}$ і $AM_{02}O$ відповідають точки μ_{01} і μ_{02} , сектору $AM_{01}M_{02}$ – відрізок $\mu_{01}\mu_{02}$ характеристики $\xi = -(\pi + 1)/2$.

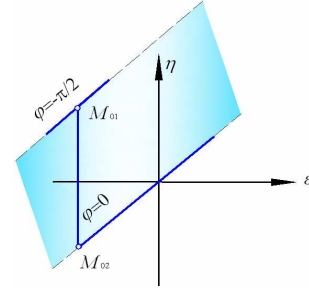


Рис. 8. Побудова пластичного напруженого стану тіла

Тиск p , що відповідає розглянутому розподілу напружень в ґрунті, визначається із останньої рівності у вигляді

$$p = k(\pi + 2)$$

і називається опором руйнуванню, оскільки перевищення цього тиску порушує пластичну рівновагу і призводить до руйнування матеріалу.

Нижче наводиться чисельний розв'язок задачі про напружений стан ґрунту під робочим органом (призма шириною $2a$). Він зводиться до заповнення таблиці (рис. б) параметрами напруженого стану. В клітинках $[0,0], [0,1], \dots, [0,n]$ записують довільно задані значення φ і відповідні їм значення χ, x, y , розраховані за формулами:

$$\left\{ \begin{matrix} x + a \\ y \end{matrix} \right\} = \pm \sqrt{2} \operatorname{acos} \left(\varphi \mp \frac{\pi}{4} \right); \quad 2\varphi = \frac{1}{2} - \eta.$$

В діагональні клітинки $[1,1], [2,2], \dots, [n,n]$ заносять значення параметрів вздовж осі y при $\varphi = 0, x = 0$.

Обчислення χ, φ, x, y у внутрішніх клітинках таблиці виконують за формулами:

$$2\chi_{k,l} = \xi_k + \eta_l; \quad 2\varphi_{k,l} = \xi_k - \eta_l \text{ та (14),}$$

а визначення величин x, y – в діагональних клітинках за формулами

$$\chi_{st} = \eta_t; \quad y_{s,t} = y_{s-1,t} - x_{s-1,t} \operatorname{tg}(\varphi_{s-1,t} - \pi/4).$$

Нормальні компоненти напруження в ґрунті вздовж осі y , визначаються за виразами

$$\sigma_x = -\rho + k(2\chi + 1);$$

$$\sigma_y = -\rho + k(2\chi - 1), \quad (15)$$

з використанням значень χ (властивостей ґрунтового середовища), які отримано в діагональних клітинках $[1,1], [2,2], \dots, [n,n]$.

Залежності між b/a і p визначаються з рівняння

$$p = \frac{2k}{b} \int_a^b \chi dy_1 + k \left(\frac{a}{b} + 1 \right). \quad (16)$$

Результати розрахунку. На рис. 9 за координатами у вузлових точках у відповідності до наведеної методики для ґрунтового середовища побудовано сітку характеристик полів деформацій.

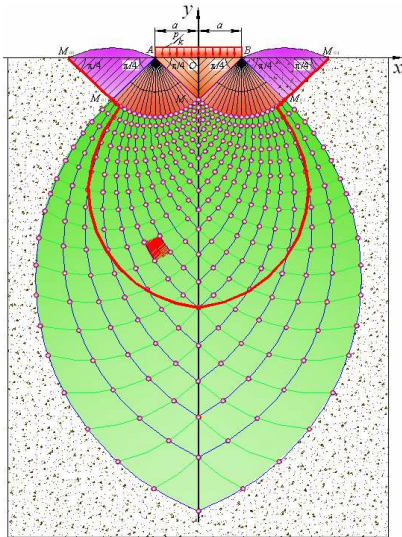


Рис. 9. Поле деформацій в ґрунті під дією штампа

Крім того, встановлено контури ядра гарантованого руйнування ґрунтового середовища, з урахуванням експериментально отриманих функціональних закономірностей, що характеризують реакцію фізичної системи на навантаження [9]. Визначення точок кривої, що описує зону руйнування ґрунтового середовища, виконано вперше у такій постановці. Завдяки цьому стало можливим дати оцінку характеру взаємодії робочих органів ЗМ з середовищем і знайти оптимальний характер цієї взаємодії.

Енергія деформування середовища. Виділимо в середовищі безкінечно малий параметр (рис. 9) і підрахуємо роботу, яку здійснюють прикладені до нього сили на можливих переміщеннях. Розглянемо роботу, яка виконується на грані, нормальній до осі Ox ,

$$\sigma_x \text{ і } \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx. \quad (17)$$

Якщо точкам тіла надати будь яке переміщення, то відстань між розглянутими гранями зміниться на величину $\delta \epsilon_x dx$. Відкинувши у виразі (17) безкінечно малу вели-

чину $\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx$ порівняно з σ_x , знайдемо, що дві рівні і протилежно спрямовані сили $\sigma_x dx dy$, які прикладено до протилежних граней клітинки, здійснюють роботу

$$\sigma_x \delta \epsilon_x dx dy.$$

Так само можна підрахувати можливу роботу, яку здійснюють поздовжні сили в напрямку осі Oy на відповідних їй можливих переміщеннях

$$\sigma_y \delta \epsilon_y dx dy \dots,$$

для дотичних напружень

$$\tau_{xy} \delta \gamma_{xy} dx dy.$$

На основі принципу суперпозицій (незалежності дії сил) можливу роботу усіх сил, прикладених до тіла, отримаємо як суму можливих робіт, яку здійснює кожна сила окремо, тобто

$$\delta(dA) = (\sigma_x \delta \epsilon_x + \sigma_y \delta \epsilon_y + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy}) dx dy. \quad (18)$$

Розділивши вираз (18) на площу тіла $d_x d_y$, отримаємо приріст роботи, віднесений до одиниці площі тіла,

$$\delta A = \sigma_x \delta \epsilon_x + \sigma_y \delta \epsilon_y + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy}. \quad (19)$$

Застосувавши теорему Ейлера до функції A , знайдемо,

$$\frac{\partial A}{\partial \epsilon_x} \epsilon_x + \frac{\partial A}{\partial \epsilon_y} \epsilon_y + \frac{\partial A}{\partial \gamma_{xy}} \gamma_{xy} = QA. \quad (20)$$

Якщо замінити у виразі (20) часткові похідні роботи напруженнями, отримаємо

$$A = \frac{1}{2} (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}). \quad (21)$$

Роботу, яка здійснюється у всій зоні, що знаходиться в умовах напруженого стану, підрахуємо, підсумовуючи її по всій площі ядра руйнування

$$A = \iint Ad_x dy.$$

Тобто

$$A = \frac{1}{2} \iint (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dx dy. \quad (22)$$

Таким чином, у результаті виконаних теоретичних та даних експериментальних досліджень вдалося отримати координати точок кривої, що описує зону руйнування ґрунтового середовища, врахувати ядро ущільнення, а також встановити бокові зони випучування. Тоб-

то завдяки такому підходу враховано взаємодію процесів ущільнення і руйнування.

Застосовуючи розроблену методику розрахунку зон руйнування, вдалося виконати дослідження для різних елементарних робочих органів, попередні результати яких показали, що залежно від форми ріжучого інструменту зона руйнування відрізняється за глибиною, шириною, та площею ядер.

Ефективними ріжучими робочими органами є такі, що забезпечують при взаємодії з ґрунтом максимальний об'єм зони його руйнування, а при ущільненні навпаки – мінімальної. На основі виконаних, за наведеною методологією, результатів досліджень стає можливим формування елементарних робочих органів у ріжучі периметри з урахуванням раціонального розташування різців один відносно одного.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у обґрунтуванні положень теорії взаємодії елементарних робочих органів машин для земляних робіт з ґрунтовим середовищем, яка об'єднує процеси руйнування та ущільнення ґрунтів, що дозволить керувати розмірами зон руйнування (або ущільнення) при розробці (або ущільненні) ґрунтів механічними способами з метою мінімізації енергоємності цих процесів.

Висновки

1). Розроблено методологічні підходи теоретичного визначення НДС в ґрунтовому середовищі під час взаємодії елементарних РО землерийних машин (на прикладі штампа) з ґрунтом.

2). Встановлено характер закономірностей виникнення і розповсюдження мікротріщин, що виникають в ґрунті під дією штампа.

3). Запропоновано підхід до оцінки раціональних параметрів елементарних РО машин, виходячи з необхідності забезпечення мінімальної роботи руйнування середовища і максимальної глибини зони руйнування.

Література

1. Мусійко В.Д., Кузьмінець М.П. Проблеми створення технології та техніки для виконання земляних робіт під час капітального ремонту промислових трубопровідних магістралей // Гірничі, будівельні, дорожні та

меліоративні машини. 2007. Вип. №70. – С. 56 - 64.

2. Кузьмінець Н.П. Создание землеройной техники для скоростной технологии капитального ремонта промышленных магистральных трубопроводов Сб. науч. тр. Владимирского государственного университета. Материалы Международной научно-технической конференции «ИНТЕРСТРОЙМЕХ – 2008». – С. 229 - 235.
3. Кузьмінець Н.П. Создание специальных землеройных машин для вскрытия магистральных трубопроводов // Строительные и дорожные машины. 2009. Вип. №10. С. 11 - 14.
4. Кузьмінець М.П. Синергетичний підхід до створення спеціального робочого обладнання землерийних машин для розкривання магистральних трубопроводів / М.П. Кузьмінець // Сб. науч. тр. Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия – подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование.– Днепропетровск.: ПГАСА. 2009.– № 51. – С. 91 - 100.
5. Кузьмінець М.П. Моделювання закономірностей поведінки ґрунтового середовища в зоні робочого обладнання землерийної машини з нахиленими секціями // Сб. науч. тр. Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия – подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование.– Днепропетровск.: – ПГАСА. – 2009.– № 51. – С. 101 - 109.
6. Прандтль Л.О. О твердости пластических материалов и сопротивление резанию. Сборник «Теория пластичности» под ред. Ю.А. Роботного. Гос. изд. иностранной литературы, 1948, 343 с.
7. Технология бетонных и железобетонных изделий / Б. В. Стефанов, Н. Г. Русанова, А. А. Волянский, 3-е изд., перераб. и доп. Киев Вища шк. 1982, 406 с.
8. Христионович С.А. Плоская задача математической теории пластичности при внешних силах, заданных на замкнутом контуре. Мат. Сб., Новая серия, Т.1, Вып. 4, 1936. – С. 511-530.
9. Сівко В.Й., Кузьмінець М.П. Напружено-деформований стан будівельних матеріалів у технологічних процесах виробництва // Збірник наукових праць ПолтНТУ. – 2009. – Т.2, Вип. 23 – С. 132 - 138.

Рецензент: Л.А. Хмара, д.т.н, проф.,
(ПДАБА, Дніпропетровськ)

Одержано: 07.12.2009 р.