

ВИКОРИСТАННЯ РЕОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРУЖНО-В'ЯЗКОПЛАСТИЧНИХ ТІЛ ДЛЯ ОПИСУ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧОГО ОРГАНУ ВІБРОПЛУГА З ОБРОБЛЮВАНИМ ГРУНТОМ

Ловейкін В.С., д.т.н., проф., Човнюк Ю.В., к.т.н., доц.,
Дяченко Л.А., здоб.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Наведена низка реологічних моделей пружно-в'язкопластичних тіл (зокрема Шведова-Бінгама), котрі використані для опису взаємодії робочого органу віброплуга з оброблюваним ґрунтом. Встановлені основні параметри вказаних моделей та особливості поведінки таких тіл у вібраційних полях, створюваних поверхнею робочого органу, яка здійснює коливання у своїй площині.

Постановка проблеми. Ґрунт має три основні механічні властивості – пружність, пластичність та в'язкість, які можуть проявляти себе при його обробці, зокрема віброплугом. Слід зазначити, що ці властивості проявляються по-різному в залежності від структури матеріалу, умов роботи (температури, вологості та ін.) й типу навантаження (статичне, динамічне, імпульсне чи тривале тощо). При різноманітних комбінаціях цих трьох факторів один і той самий матеріал (оброблюваний ґрунт) може проявляти одну з трьох основних механічних властивостей чи деяку комбінацію з них. При зміні деяких з названих факторів можна змінити поведінку ґрунту і отримати іншу переважаючу комбінацію механічних властивостей.

Теоретичний опис цього розмаїття поведінки ґрунтів, що обробляються, здійснюється шляхом створення механіко-математичних моделей, котрі ідеалізують реальну поведінку матеріалу, відображаючи його найбільш характерні властивості. Значне розмаїття ґрунтів та властивостей, які проявляють себе за різних умов роботи, а також намагання до адекватного опису цього розмаїття породжують багато різноманітних механіко-математичних моделей.

Одновимірні експерименти (зокрема, при дослідженні взаємодії робочого органу віброплуга з оброблюваним ґрунтом) є основою для створення одновимірних механіко-математичних моделей. За допомогою ідеалізації отриманої експериментальним шляхом залежності між основними напруженнями та деформаціями можна отримати визначальний зв'язок між ними для відповідної механіко-математичної моделі.

У даному дослідженні послідовно розглянуті одновимірні механіко-математичні моделі, які використовуються в аналізі взаємодій «віброплуг – робочий орган – оброблюваний ґрунт».

Аналіз публікацій за темою дослідження. Основні пружно-в'язкопластичні моделі, які використані у даному дослідженні, наведені у

роботах [1, 2]. Метод реологічних моделей розвинутий у [3]. Слід зазначити й відомий підхід до побудови теорії пластичності С. Батдорфа, Б. Будянського[4], заснований на представленні при утворенні у оброблювальному ґрунті поверхонь ковзання. Такий підхід отримав успішний розвиток як у нашій державі, так і за кордоном.

Мета досліджень полягає в обґрунтуванні моделей реологічних моделей деформування пружно-в'язкопластичних тіл / матеріалів для опису взаємодії робочого органу віброплуга з оброблюваним ґрунтом.

Результати досліджень. Розглянемо декілька реологічних моделей деформування пружно-в'язкопластичних тіл.

1. Пружно-в'язкопластичне тіло Бінгама (одновимірне)

Визначальні залежності у цій реологічній моделі оброблюваного віброплугом ґрунту мають вид:

$$\sigma_x = \begin{cases} E \cdot \varepsilon_x, & \sigma_x \leq \sigma_p, \\ \sigma_p + \eta_v \cdot (\dot{\varepsilon}_x - \frac{\dot{\sigma}_x}{E}), & \sigma_x > \sigma_p, \end{cases} \quad (1)$$

де σ_x , ε_x – напруження та деформація вдовж вісі ОХ, σ_p – початкова межа текучості при одновимірному розтягу, E – модуль пружності, η_v – динамічна в'язкість матеріалу, $\dot{\sigma}_x$, $\dot{\varepsilon}_x$ – швидкість зміни у часі напруження та деформування матеріалу.

Механічна модель ґрунту має вид, зображений на рис.1.

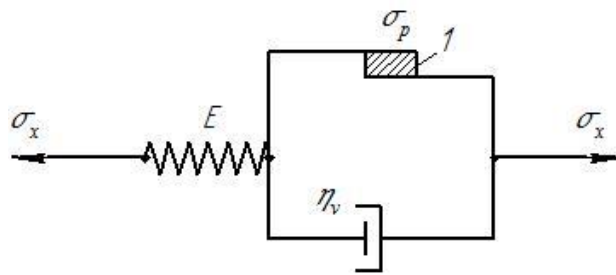


Рис. 1 – Механічна модель Бінгама

У даній моделі елемент тертя 1 створює деформацію при напруженні, що перевищує межу текучості σ_p . Такий матеріал не має пластичного зміцнення.

2. Пружно-в'язкопластичне тіло Шведова (одновимірне)

$$\dot{\varepsilon}_x = \begin{cases} \frac{1}{E_1} \cdot \dot{\sigma}_x, & \sigma_x \leq \sigma_p, \\ \left(\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right) \cdot \dot{\sigma}_x + \frac{(\sigma_x - \sigma_p)}{\eta_v}, & \sigma_x > \sigma_p, \end{cases} \quad (2)$$

де: E_1 , E_2 , η_v – константи матеріалу (модулі пружності та коефіцієнт динамічної в'язкості відповідно), σ_p – межа (границя) текучості при чистому розтягу матеріалу.

Механічна модель ґрунту у цьому випадку має вид, зображений на рис. 2. Слід зазначити, що як і у попередній моделі (1) даний матеріал не має пластичного зміцнення.

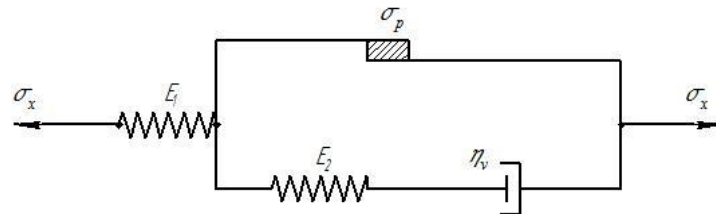


Рис. 2 – Механічна модель Шведова

Особливості матеріалів, деформування котрих відповідає реологічним моделям Шведова та Бінгама, зводиться до наступного. До певної межі ґрунт деформується пружно, а при перевищенні цієї межі проявляються його в'язкопластичні властивості. Ідеалізовані криві повзучості для цих матеріалів показані на рис. 3. ($\sigma_1 < \sigma_p$, $\sigma_2 > \sigma_p$)

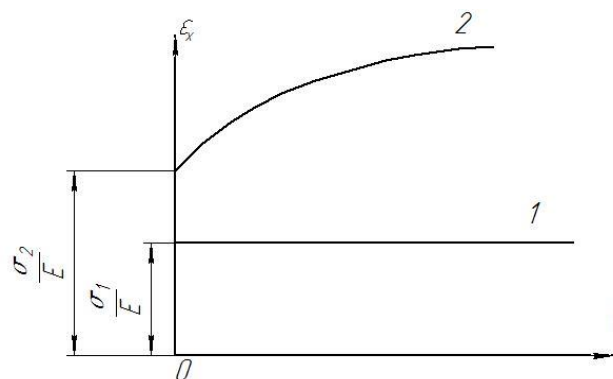


Рис. 3 – Ідеалізовані криві повзучості для матеріалів (у межах моделей Шведова та Бінгама):

$$\sigma_1 < \sigma_p, \sigma_2 > \sigma_p$$

Приблизні ідеалізовані криві релаксації, які відповідають цим моделям, зображені на рис. 4. Релаксація проявляє себе при перевищенні межі текучості, й при $t \rightarrow \infty$ мають місце залишкові асимптотичні напруження σ_r , які дорівнюють межі текучості σ_p для тіл без пластичного зміцнення.

3. Реологічна модель Шведова-Бінгама текучих систем

У тензорному виді модель лінійно-в'язкої нестискуваної рідини зазвичай виражається узагальненим законом Ньютона [5]:

$$\tau_{ij} = -p \cdot \delta_{ij} + 2\mu \cdot \dot{\epsilon}_{ij}, (i, j) = (\overline{1,3}), \quad (3)$$

де τ_{ij} – компоненти тензора напружень, $\rho = -\frac{1}{3} \cdot \tau_{ij}$ – ізотропний гідродинамічний тиск, який співпадає з термодинамічним (якщо індекси повторюються, тоді під цим розуміють процес визначення суми (за А. Енштейном), тобто $\tau_{ij} = \tau_{11} + \tau_{22} + \tau_{33}$), σ_{ij} – символ (тензор) Кронекера, μ – зсувна динамічна в'язкість системи.

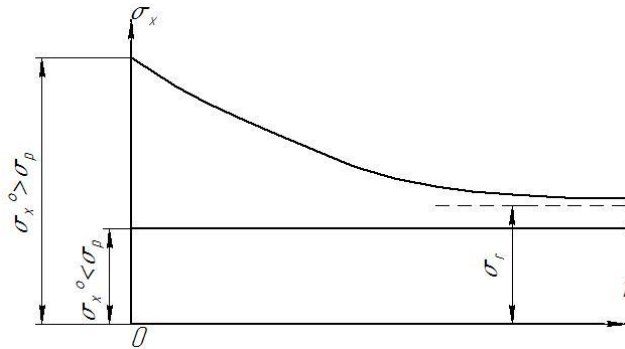


Рис.4 – Ідеалізовані криві релаксації для матеріалів (у межах моделей Шведова та Бінгама)

Для умов одновимірного зсувного руху (течії) нестискуваної рідини закон Ньютона формулюється у вигляді:

$$\tau = -\mu \cdot \frac{du}{dy_{ij}} = -\mu \cdot \dot{\gamma}, \dot{\gamma} = \frac{du}{dy}, \quad (4)$$

або

$$\tau = -\varrho \cdot \frac{d(p \cdot u)}{dy}, \quad (5)$$

де $\varrho = \frac{\mu}{\rho}$ – кінематична в'язкість ґрунту, представленого у вигляді в'язкої рідини; u – швидкість її (рідини) руху; y – координата, яка поперечна щодо напрямку течії рідини; ρ – щільність матеріалу (рідини). У подальшому приймаємо ґрунт у якості моделі «квазірідини», тобто рідини, яка має складну структуру (т. з. дисперсні текучі системи). Крива одновимірного руху (течії) таких «квазірідин» відрізняється від Ньютонівської (рис. 5).

При $\dot{\gamma} = 0$ і $\tau_0 = 0$ для чисто «ньютонівських» рідин, а для не ньютонівських – Шведова-Бінгама (лінійно-в'язкопластичних) течія починається лише після перевищення деякого порогу, який називається межею текучості τ_0 . Отже, для «квазірідини» (типу оброблюваного віброплугом ґрунту) рівняння реологічного стану, яке адекватно описує зсувні деформації у матеріалі, має вид:

$$\tau = \tau_0 \cdot \frac{\dot{\gamma}}{|\dot{\gamma}|} + \mu_p \cdot \dot{\gamma} = \tau_0 \cdot \text{sign} \dot{\gamma} + \mu_p \cdot \dot{\gamma}, \quad (6)$$

де $\text{sign} \dot{\gamma} = \begin{cases} 1, \dot{\gamma} > 0; \\ -1, \dot{\gamma} < 0; \\ 0, \dot{\gamma} = 0; \end{cases}$ – функція знаку $\dot{\gamma}$ («сигнум»),

μ_p – пластична або структурна в'язкість.

При $\tau < \tau_0$ в'язкопластичне середовище може вести себе як тверде, недеформоване тіло (модель Сен-Венана) або як ідеально пружне тіло Гука (модель Прандтля) (рис. 6)

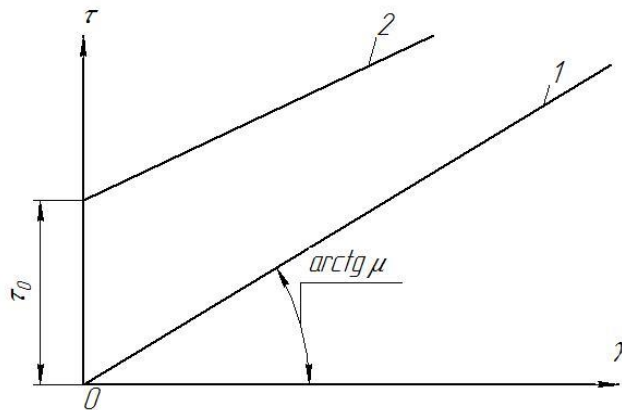


Рис. 5 – Криві одновимірної течії $\tau = f(\dot{\gamma})$: 1 – чисто в'язка («Ньютонівська») рідина; 2 – вязкопластична рідина / квазірідина Шведова-Бінгама (τ_0 – межа / границя текучості, $\dot{\gamma}$ – рухливість рідини / квазірідини, μ – зсувна (динамічна) в'язкість)

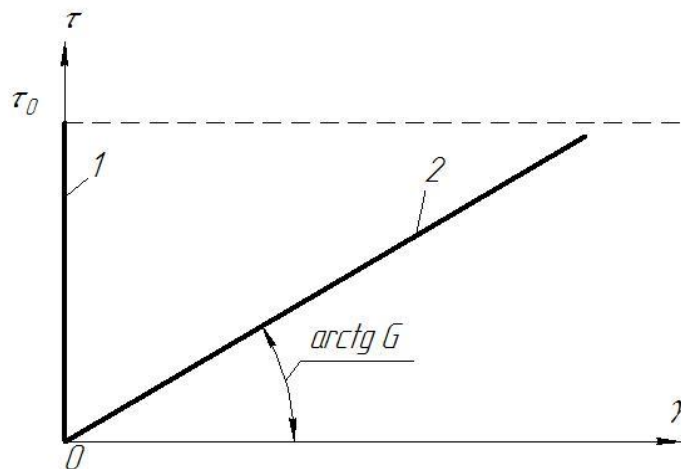


Рис. 6 – Типові криві деформування (зсуву) в'язкопластичних середовищ (модель Шведова-Бінгама) при $\tau < \tau_0$: 1 – модель Сен-Венана ($\gamma = 0, 0 < \tau < \tau_0$); 2 – ідеальне пружне тіло Гука (модель Прандтля), $\tau = G \cdot \gamma$, G – модуль зсуву матеріалу.

З (6) при $\dot{\gamma} > 0$ маємо:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} = \tau_0 + \mu_p \cdot \frac{du}{dy}, \quad (7)$$

Таким чином, використання в'язкопластичних моделей середовища (оброблюваного ґрунту віброплугом) з лінійною кривою течії ($\tau = f(\dot{\gamma})$) типу Шведова-Бінгама зводить задачі аналізу розповсюдження у таких середовищах вібраційних збуджень (джерелом вібрацій є віброплуг) по суті до задач аналогічного типу, які розв'язані для моделей в'язких («не ньютонівських» рідин / квазірідин) середовищ, що знаходяться під впливом деформацій зсуву з єдиною заміною тензору напружень σ_{ij} (або компоненти його τ) на ($\tau = \tau_0$).
Всі інші критерії та результати аналізу в'язких середовищ (в'язко-пружних середовищ типу тіл Максвелла) залишаються в силі. Проте з'являється при $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0$ додатковий опір рухові віброплуга у оброблюваному ґрунті, пов'язаний з τ_0 – це «сила зчеплення», яка може бути визначена за допомогою виразу:

$$F_{зчепл} = \tau_0 \cdot S \quad (8)$$

Список використаних джерел

1. Reiner M. Rheology. Handbuch der Physik. Vol. VI / M. Reiner. – Springer – Verlag, 1958.
2. Коларов Д. Механика пластических сред / Д. Коларов, А. Балтов, Н. Бончева. – М.: Мир, 1979. – 304с.
3. Пальмов В.А. Колебания упруго-пластических тел / В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1976. – 350с.
4. Батдорф С. Математическая теория пластичности, основанная на концепции скольжения / С. Батдорф, Б. Будянский // Сб. «Механика». – 1961. – №1 (71). – С.135 – 155.
5. Шульман З.П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей / З. П. Шульман. – М.: Энергия, 1975. – 352с.

Аннотация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УПРУГО-ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЕ ТЕЛ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА ВИБРОПЛУГА С ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОЧВАХ

Ловейкин В., Човнюк Ю., Дяченко Л.

Приведен ряд реологических моделей упруго-вязкопластичных тел (в частности Шведова-Бингама), которые использованы для описания взаимодействия рабочего органа виброплуга с обрабатываемым грунтом. Установлены основные параметры указанных моделей и особенности поведения таких тел в вибрационных полях, создаваемых поверхностью рабочего органа, которая совершает колебания в своей плоскости.

Abstract

USING ELASTIC-RHEOLOGICAL MODEL VISCOPLASTIC TEL THE INTERACTION BODY WORK VIBROPLUGA WITH CULTIVATED SOILS

V. Loveykin, J. Chovniuk, L. Dyachenko

A number of rheological models of viscous-resilient bodies (including the Shvedov-Binham model) have been used to describe the interaction between the working parts of the vibration plough and the cultivated soil. The basic parameters of these models, and behavior of such bodies in vibration fields generated by the surface of the working parts which vibrate in their plane have been determined.