

**МОЖЛИВІ РЕОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ РЕЛАКСАЦІЇ ҐРУНТІВ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ПРИ ЇХ
УЩІЛЬНЕННІ ТА ОБРОБЦІ ВІБРОПЛУГОМ**

Ловейкін В.С., д.т.н., професор, Човнюк Ю.В., к.т.н., доцент,
Національний університет біоресурсів і природокористування України,

Дяченко Л.А., к.т.н.,

*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і
природокористування України «Ніжинський агротехнічний інститут»*

*Запропоновані і обґрунтовані реологічні моделі релаксації ґрунтів
сільськогосподарського призначення при їх ущільненні та обробці вібропługом.
Визначені основні залежності в'язкості (ефективної в'язкості) від параметрів
вібрації.*

Постановка проблеми. Основна технологічна задача при ущільненні ґрунтів сільськогосподарського призначення або при їх обробці вібропługами, культиваторними лапами тощо полягає у приведенні ґрунтової суміші (сукупність твердої, рідкої та газоподібної фаз) у стан течії з метою заповнення заданого об'єму (форми) й граничного значення пористості шляхом видалення затиснутого повітря. Ця задача вирішується шляхом динамічного знакозмінного навантаження. У залежності від характеру динамічного впливу загальний цикл ущільнення можна умовно розділити на три стадії. На першій спостерігається переукладання складових ґрунту, для котрих характерним є випадкове розміщення гранул й повітряних порожнин, а також неповний контакт часточок між гранулами. Така будова ґрунту з позицій фізико-механічних і реологічних властивостей може бути класифікована як система з нестійкою структурою. Під дією динамічного навантаження система легко переходить у другу стадію шляхом перебудови випадкової структури ґрунту у стійку у результаті переукладання та взаємної орієнтації гранул ґрунту. Цей період характеризується утворенням сольватних оболонок, виділенням оточенням рідкою фазою поверхні крупних гранул ґрунту. Виникають умови, коли систему можна подати у вигляді набору часточок зі змащенням. Останній етап можна оцінити як стадію компресійного ущільнення, на якій досягається незначний приріст щільності оброблюваного ґрунту.

Доцільність розділення процесу ущільнення ґрунту сільськогосподарського призначення (ГСП), при його обробці вібропługом / культиваторною лапою диктується особливостями фізико-механічних явищ, які протікають у подібних сумішах. Вивчення умов трансформації сил сухого тертя у в'язке, причин виникнення пружних і дисипативних сил, механізму зниження ефективної / уявної в'язкості та інших питань реології ГСП сприяє вирішенню багатьох технологічних задач їх обробки і у першу чергу спрямовані на вибір

раціональних режимів (і параметрів) ущільнення та вібрації.

Як правило, реологічні дослідження ГСП проводяться у статичному стані чи в усталеному режимі коливань. Відсутні дані про поведінку ГСП протягом усього циклу ущільнення чи дії вібрацій. У даній роботі зроблена спроба провести оцінку реологічних властивостей ГСП з використанням динамічного підходу / методу шляхом дослідження вільних затухаючих коливань системи взаємодії частинок / гранул ГСП на етапах ущільнення (або вібраційної дії), фазових співвідношень між деформаціями і напруженнями.

Аналіз публікацій по темі дослідження. Уяву про характер зміни напружень і деформацій у ГСП у залежності від його фізико-механічних властивостей при механічному впливі дають реологічні моделі. Останні представляють середовище (ГСП) у вигляді спрощених механічних моделей складених з елементів, кожний з котрих або їх сполучення дають уяву про основні властивості матеріалу й характер напружено-деформованого стану під дією зовнішніх навантажень [1, 2].

Згідно відомій аксіомі реології [3], кожний реальний матеріал (ГСП у тому числі), має всі реологічні властивості, котрі проявляють себе у різних ступенях у залежності від умов протікання деформації. У більшості відомих моделей ГСП на різних етапах ущільнення й вібраційного впливу робочих органів сільськогосподарських машин (віброплуг, культиваторна лапа, віброптрамбувач тощо) сполучаються як пружні, так і в'язкі, пластичні властивості оброблюваного ґрунту.

Результати цитованих вище робіт будуть використані в даному дослідженні.

Мета даної роботи полягає в обґрунтуванні реологічних моделей ГСП та визначені на їх основі основних параметрів оброблюваних ґрунтів в умовах дії на них вібраційних полів.

Виклад основного змісту дослідження

1. Реологічна модель Кельвіна-Фойгта [4].

Вплив частоти коливань (ω) на прояв властивостей ГСП, як середовища, що описується реологічною моделлю Кельвіна-Фойгта, може бути визначений рівнянням наступного типу:

$$\frac{\tau}{G} = \gamma + \lambda \cdot \dot{\gamma}, \quad \dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}, \quad (1)$$

де τ – напруження зсуву;

G – модуль зсуву ГСП; γ – деформація зсуву; $\lambda = \frac{\eta}{G}$; η – динамічна в'язкість ґрунту;

t – час.

При зміні деформації за синусоїдальним законом $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$ (або $\gamma = \gamma_0 \exp(i\omega t)$, $i^2 = -1$), маємо:

$$\tau = G \cdot \gamma_0 \cdot (\sin \omega t + \lambda \cdot \omega \cdot \cos \omega t) = G \cdot \gamma_0 \cdot \sqrt{1 + \lambda^2 \omega^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

де γ_0 – амплітуда деформації зсуву у ГСП, $\varphi = \arctg\{\lambda \cdot \omega\}$.

З розв'язку (2) випливає, що результуюче напруження буде також синусоїдальним з тією ж частотою, що й деформація, але з іншою фазою.

При цьому:

$$\begin{cases} \varphi \rightarrow 0, & \lambda \rightarrow 0, & \omega \rightarrow 0, & \tau = G \cdot \gamma, \\ \varphi \rightarrow \pi/2, & (\lambda, \omega) \rightarrow \infty, & \tau = G \cdot \gamma_0 \cdot \lambda \cdot \omega \cdot \cos \omega t \end{cases} \quad (3)$$

Ефективне значення в'язкості у межах цієї моделі визначається виразом:

$$\eta_{\text{еф}} = \sqrt{\eta^2 + \frac{G^2}{\omega^2}} \quad (4)$$

При зростанні ω $\eta_{\text{еф}} \rightarrow \eta$ (рис. 1).

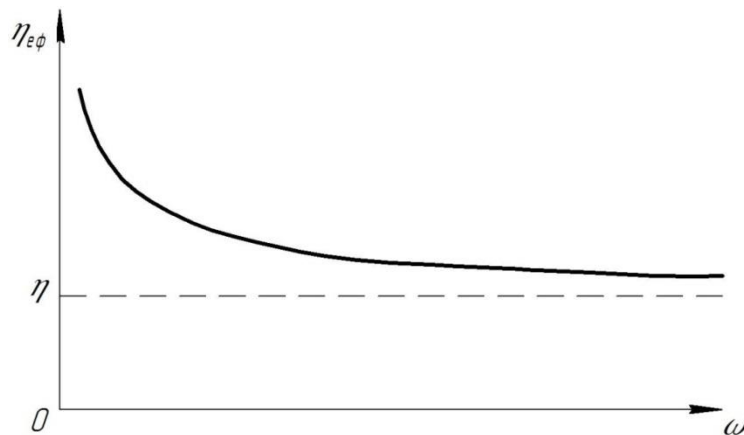


Рис.1 – Залежність $\eta_{\text{еф}}(\omega)$

2. Реологічна модель Максвелла. Залежність між τ та γ має вид:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \left[\frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\eta} \right]. \quad (5)$$

Для синусоїдальної зміни у часі деформації:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{i\omega t}, \quad \dot{\gamma} = \gamma_0 \cdot \sin \omega t \quad (6)$$

Маємо:

$$\tau = \left[\tau_0 - \frac{2G^2 \cdot \gamma_0 \cdot \omega}{\eta \cdot \left\{ \omega^2 + \left(\frac{G}{\eta} \right)^2 \right\}} \right] \cdot e^{-\frac{G}{\eta} \cdot t} + \frac{2G \cdot \gamma_0 \cdot \omega}{\sqrt{\omega^2 + \left(\frac{G}{\eta} \right)^2}} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

де $\varphi = \arctg\left(\frac{G}{\eta \cdot \omega}\right)$, $\tau_0 = \tau|_{t=0}$

З виразу (7) випливає, що $\varphi \rightarrow 0$ при $\omega \rightarrow \infty$, $\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}$ при $\omega \rightarrow 0$. Крім того, при збільшенні частоти ω поведінка τ наступна:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{G}{\eta} \cdot t} + 2G \cdot \gamma_0 \cdot \sin \omega t. \quad (8)$$

Значення $\eta_{\text{еф}}$ у цій моделі визначається виразом:

$$\eta_{\text{ef}} = \frac{\eta}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2 \cdot \eta^2}{G^2}}} \quad (9)$$

Залежність (9) зображена на рис.2

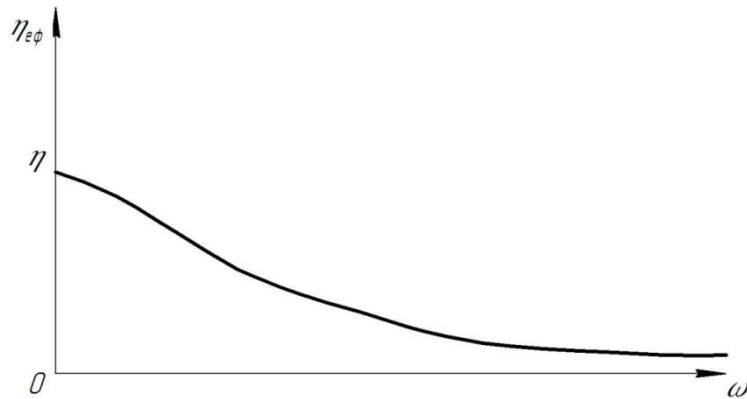


Рис.2 – Залежність $\eta_{\text{ef}}(\omega)$ у моделі Максвелла

3. Реологічна модель Шведова-Бінгама

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (10)$$

де τ_0 – граничне напруження зсуву.

У цій моделі проявляють себе в'язкопластичні властивості ГСП. Якщо $\gamma(t)$ змінюється за законом (6), тоді для τ у межах цієї моделі маємо:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (11)$$

З виразу (11) видно, що збільшення ω збільшує й величину τ . Величину η_{ef} можна у цьому випадку знайти з виразу:

$$\eta_{\text{ef}} = \left\{ \eta^2 + \frac{\tau_0}{\omega^2 \cdot \gamma^2} \right\}^{1/2} \quad (12)$$

За формою графік залежності $\eta_{\text{ef}}(\omega)$ (12) співпадає з наведеним на рисунку 1.

4. Пружно-в'язкопластична реологічна модель ГСП:

У цьому випадку маємо:

$$\frac{\tau}{G} = \frac{\tau_0}{G} + \gamma + \frac{\eta}{G} \cdot \dot{\gamma} \quad (13)$$

Якщо перенести перший доданок у правій частині рівняння (13) на протилежну сторону рівняння, тоді матимемо:

$$\frac{\tau - \tau_0}{G} = \gamma + \frac{\eta}{G} \cdot \dot{\gamma} \quad (14)$$

Використовуючи підходи, які застосовувались вище для моделі Кельвіна-Фойгта, з (14) матимемо для γ , що змінюється за законом (6):

$$\frac{\tau - \tau_0}{G} = \gamma_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\eta^2}{G^2} \cdot \omega^2} \cdot \sin(\omega t + \tilde{\varphi}), \quad \tilde{\varphi} = \text{arctg}(\lambda \omega) \quad (15)$$

Для $\eta_{\text{еф}}$ можна отримати наступний вираз:

$$\eta_{\text{еф}} = \sqrt{\eta^2 + \left(\frac{\tau_0}{\omega \cdot \gamma} + \frac{G}{\omega}\right)^2} \quad (16)$$

Залежність $\eta_{\text{еф}}(\omega)$ з (16) по формі співпадає з наведеною на рис. 1.

Слід зазначити, що у всіх чотирьох наведених вище реологічних моделях спостерігається зменшення $\eta_{\text{еф}}$ при зростанні частоти ω , а також зростання величини τ .

5. Оцінка дисипативних процесів у ГСП. Одним із зовнішніх проявів внутрішнього тертя є утворення замкненої петлі гістерезису при усталеному циклічному деформуванні зразка ГСП, яка представляє собою двозначну залежність між напруженням і деформацією ґрунту. Площею цієї петлі вимірюється у певному масштабі енергія, втрачена за один цикл деформації в усьому об'ємі матеріалу зразка ГСП [5]. Якщо цю площу вважати незалежною від швидкості деформації ($\dot{\gamma}$), тоді можна рівняння петлі гістерезису покласти замість закону Гука в основу теорії деформування пружних систем ГСП, зокрема з частотно незалежним внутрішнім тертям.

Розглянемо для кожної з названих і досліджених щодо інших параметрів моделі оцінку величини енергії, яка розсіюється у одиниці об'єму ГСП за один цикл деформування (за період $T = \frac{2\pi}{\omega}$). Ця величина може бути виражена наступним чином:

$$\overline{(E)}_T = \int_0^T \tau d\gamma = \int_0^T \tau(t) \cdot d\gamma(t) = \int_0^T \tau(t) \cdot \frac{d\gamma}{dt} dt = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \tau \cdot \dot{\gamma} \cdot dt \quad (17)$$

Зазначимо, що розмірність $[\overline{(E)}_T] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$

Так, для моделі Кельвіна-Фойгта маємо:

$$\overline{(E)}_T = \frac{G \cdot \gamma_0^2 \cdot 1}{2 \cdot 1} \cdot \sqrt{1 + \frac{\eta^2}{G^2} \cdot \omega^2} \cdot \sin \left\{ \arctg \left(\frac{\eta}{G} \cdot \omega \right) \right\} \quad (18)$$

При зростанні ω вираз (18) прямує до зниження:

$$\overline{(E)}_T = \frac{\gamma_0^2 \cdot 1 \cdot \eta \cdot \omega}{2} = \frac{\gamma_0^2 \cdot \eta \cdot \omega}{2} \quad (19)$$

В кінцевому випадку енергія $\overline{(E)}_T$ споживається ГСП на його внутрішнє тертя, розігрів та руйнацію.

Для пружно-в'язкопластичної реологічної моделі ГСП щодо $\overline{(E)}_T$ маємо той самий результат (18).

Для моделі Шведова-Бінгама $\overline{(E)}_T$ можна знайти з (19).

Для моделі ГСП типу Максвелла (5) для $\overline{(E)}_T$ маємо:

$$\overline{(E)}_T = \frac{G \cdot \gamma_0^2 \cdot \omega}{\sqrt{\omega^2 + \frac{G^2}{\eta^2}}} \cdot \sin \left\{ \arctg \left(\frac{G}{\eta \cdot \omega} \right) \right\} \quad (20)$$

На відміну від всіх інших моделей, розглянутих вище, $\overline{(E)}_T \rightarrow 0$ у цьому випадку при $\omega \rightarrow \infty$. (Слід зазначити, що співвідношення (20) отримане за умови: $\frac{G}{\eta} \cdot \frac{2\pi}{\omega} \ll 1$).

Висновки. 1. Обґрунтовані реологічні моделі ГСП та визначені їх основні параметри в умовах дії вібраційних полів. Вказані моделі враховують пружні, пластичні та в'язкі характеристики оброблюваних ґрунтів.

2. Визначені оцінки дисипативних процесів, що відбуваються у ГСП, за наявного вібраційного поля дії.

3. Отримані у роботі результати можуть бути у подальшому використані для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку робочих органів сільськогосподарських машин, що взаємодіють з ГСП (культиваторні лапи, віброплуги, вібротрамбуючі машини тощо) як на стадіях конструювання (чи проектування), так і у режимах реальної експлуатації.

Список використаних джерел

1. Завьялов М.А. Возможная реологическая модель релаксации асфальтобетонной смеси при уплотнении / М.А. Завьялов, А.М. Завьялов // Строительные и дорожные машины. – 2002. – №7. – С.25 – 26.
2. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М.: Высшая школа, 1981. – 335с.
3. Рейнер М. Реология / М. Рейнер. – М.: Наука, 1965. – 224с.
4. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 520с.
5. Кочнева Л.Ф. Внутреннее трение в твердых телах при колебаниях / Л.Ф. Кочнева. – М.:Наука, 1979. – 96с.

Аннотация

ВОЗМОЖНЫЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛИ РЕЛАКСАЦИИ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ИХ УПЛОТНЕНИЕМ ОБРАБОТКЕ ВИБРОПЛУГОМ

Ловейкін В., Човнюк Ю., Дяченко Л.

Предложены и обоснованы реологические модели релаксации почв сельскохозяйственного назначения при их уплотнении и обработке виброплугом. Определены основные зависимости вязкости (эффективной вязкости) от параметров вибрации.

Abstract

POSSIBLE RHEOLOGICAL MODEL OF RELAXATION IN SOIL OF AGRICULTURAL PURPOSE OF SEALS AND PROCESSING VIBROPLUGHOM

V. Loveykin, Yu. Chovniuk, L. Dyachenko

Rheological models of relaxation soils for agricultural purposes in their compression and processing vibration plow were proposed and justified. The basic dependence of viscosity (effective viscosity) from vibration parameters was determined.