

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.891:631.31

В.В. Аулін, к.ф.-м. наук, професор
М.І. Черновол, д.т.н. професор
А.А. Тихий, к.т.н.

РЕОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИЯВЛЕННЯ МЕХАНІЗМУ РУЙНУВАННЯ І РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

Кіровоградський національний технічний університет, e-mail: aulin52@mail.ru

В статті розглянута оцінка характеру руйнування шару ґрунту, прилеглого до РОГМ, з енергетичної точки зору на основі енергії по Гріффитсу та з використанням реологічного підходу. Проаналізовано реологічні моделі ґрунту, їх структуру, характер напружень і деформацій під дією РОГМ. Показано, що руйнування ґрунту відбувається при деформаціях розтягу, що обумовлює врахування реологічного підходу при розробці енергозберігаючих технологій обробітку ґрунту.

Ключові слова: ґрунт, робочий орган ґрунтообробних машин, реологічна модель, саморозпушування ґрунту, руйнування, деформація, напруження.

Вступ. В основі існуючих способів обробітку ґрунту лежить механічна дія робочих органів ґрунтообробних машин (РОГМ) на ґрунт стискуванням. Незважаючи на значні теоретичні і експериментальні дослідження в цьому напрямі [1,2], принципів якісних змін дії на ґрунт з урахуванням конструкції РОГМ практично не відбулося. Причиною цього є спрощений підхід до ґрунту як об'єкту технологічної дії, недостатнє вивчення і врахування його структури, складу, комплексу властивостей та характеристик, зміни стану при обробітку. Процеси, які відбуваються в ґрунті слід розглядати на різних структурних рівнях з урахуванням напружено-деформованого стану (НДС) прилеглого до РОГМ шару ґрунту, його реологічних властивостей та характеристик [3].

При цьому, для того щоб пояснити можливість існування ефективних підходів до виявлення механізму руйнування ґрунту та на цій основі розробити енергозберігаючі технології його обробітку, слід взяти до уваги характеристики внутрішнього та зовнішнього тертя, розподіли щільності, в'язкості, пластичності, полів напружень і деформацій, обґрунтування кількісної оцінки енергії руйнування прилеглого до РОГМ шару ґрунту та більш адекватні реологічні моделі ґрунту [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [5], що тверда фаза ґрунту не є простим набором частинок, що підтверджується великою різноманітністю типів ґрунту, їх характеристик та властивостей. У цьому випадку правомірно говорити про ґрунт як трибоелемент, який складається із системи матеріальних частинок, що взаємодіють між собою за фізичними законами і має реологічні характеристики і властивості [1].

У реології ґрунтів в якості фундаментальних властивостей розглядають: пружність; пластичність і в'язкість. Усі інші механічні властивості є складним поєднанням різних комбінаціях цих трьох фундаментальних властивостей [6].

Основними явищами, в реології ґрунтів є: релаксація; повзучість і довготривала міцність. При цьому всі процеси, що протікають в ґрунті відбуваються, в основному в ізотермічних умовах [3].

У твердофазній підсистемі ґрунту діють зовнішні (гравітаційні, сили і прикладені навантаження) та внутрішні (усередині частинок і між ними) сили [7]. Усі ці сили, природа яких розглянута в працях Ван-дер-Ваальса, Ф.Лондона, Е.М. Лівшица, Б.В. Дерягіна та ін., створюють відповідні фізичні поля з певним енергетичним впливом.

Постановка завдання. Обґрунтувати підхід до виявлення механізму руйнування ґрунту та розробки ефективних енергозберігаючих технологій його обробітку на основі реологічних характеристик та властивостей.

Вирішення поставленого завдання

В результаті взаємодії частинок ґрунту та його фаз, адсорбції водяної пари із навколишнього середовища та інших процесів, в ґрунті безперервно відбувається його саморозпушування, як однієї з форм самоорганізації. Дослідження свідчать, що найбільш розвинений цей факт в чорноземних ґрунтах на карбонатній основі [6,7].

Саморозпушуванню ґрунту, сприяє цілий ряд чинників: процеси зволоження і висихання; розпушуюча дія корневих систем рослин; діяльність мікроорганізмів і черв'яків; процеси

промерзання і розмерзання ґрунтового шару та інші.

При дії РОГМ поверхня руйнування ґрунту розвивається неоднозначно, має ступінчастий характер, залежний від швидкісного режиму обробітку. Звісно, що кількість впливових чинників при цьому зростає, динамічного характеру набувають силові фактори, спостерігаються значні динамічні коливання частинок ґрунту та інші. Величина і напрям руйнівної сили при цьому мають стохастичний характер, а тому більш доцільно використати енергетичний підхід, тобто провести оцінку енергії, що витрачається на обробітку ґрунту. Доцільним є використання енергії по Гріффитсу, що витрачається на руйнування матеріалу з формуванням тріщин [7]. Для пласту, прилеглому до робочої поверхні РОГМ, поверхнева енергія тріщини, що утворилася в ньому при дії РОГМ силою N і швидкості руху v , дорівнює:

$$W_p = U_n = \frac{Nvt}{2} - \frac{\pi l^3 \sigma^2}{2E} + 4\alpha_n S_n, \quad (1)$$

де $Nvt/2$ – потенціальна енергія накопичена в пласті в результаті його стискування, Дж; $\pi l^3 \sigma^2/2E$ – потенціальна енергія, що звільняється через утворену тріщину (площина) зсуву, Дж; $4\alpha_n S_n$ – поверхнева енергія утвореної тріщини, Дж.

Поверхнева енергія руйнування одиниці маси ґрунту при цьому є питомою енергією його кришіння A_n РОГМ:

$$A_n = \frac{W_p}{\Delta m} = \alpha_n (S_{нов}^{num} - S_{нов.д}^{num}), \quad (2)$$

де α_n – поверхневий натяг ґрунтової частинки; $S_{нов}^{num}$, $S_{нов.д}^{num}$ – відповідно агротехнічно необхідна та дійсна питомі поверхні ґрунту, м²/кг.

Прийнято, що агротехнічна питома поверхня чорноземних ґрунтів степових зон в природному рихлому стані складає $1,3 \cdot 10^5$ м²/кг, а середня дійсна їх питома поверхня становить $0,90 \cdot 10^5$ м²/кг [2]. За цими даними можна визначити, що для кришіння пласту ґрунту щільністю $1,5 \cdot 10^3$ кг/м³ необхідно витратити енергію, рівну 436 кДж. З іншого боку загальна енергія кришіння ґрунту $U_{заг}$ дорівнює:

$$U_{заг} = \frac{N_{ст}^2 l_n}{2E_{ст} ab}, \quad (3)$$

де $N_{ст}$ – загальна сила стискування пласта, Н; l_n – довжина пласта, м; $E_{ст}$ – модуль стискування пласта, Па; a , b – товщина і ширина пласту, м.

Звідки сила стискування, що забезпечує певну загальну енергію кришіння дорівнює:

$$N_{ст} = \sqrt{\frac{2E_{ст} ab U_{заг}}{l_n}}. \quad (4)$$

Аналіз формули (4) та експериментальні дані свідчать, що для сучасних РОГМ при забезпечення необхідної сили стискування пласту з подальшим його руйнуванням необхідно більш ніж в 1,5 рази збільшити швидкість руху РОГМ. Але це приведе до зростання тягового опору РОГМ, що збільшить енергоємність обробітку ґрунту. Зазначене обумовлює необхідність розробки технологій обробітку ґрунту РОГМ, які істотно відрізняються від стискуючої дії на пласт ґрунту і дадуть можливість знизити енергоємність обробітку ґрунту. Для цього потрібні моделі, які враховують закономірності взаємодії РОГМ з ґрунтом, склад, структуру, характеристики та властивості ґрунту на різних рівнях, у тому числі і на міжмолекулярному.

При трибофізичних дослідженнях поведінки прилеглому до РОГМ пласту ґрунту ефективним є використання реологічних методів. Для опису поведінки ґрунту застосовують різні реологічні моделі: Гука, Ньютона, Максвелла, Кельвіна, Сен-Венана, Фойгта, Шведова, Бінгема та ін [5]. При цьому складні реологічні моделі будуються шляхом послідовного або паралельного з'єднання фундаментальних моделей. В їх символічному записі послідовне з'єднання двох моделей позначається горизонтальною рисою між їх символами (наприклад, Гука-Ньютона $N - N = M$ - Максвелла), а паралельно-вертикальною рисою (наприклад, Гука-Ньютона $N | N = F$ - Фойгта). Першим елементом у змістовній формі складних реологічних моделей зазначається вид деформації за першою складовою фундаментальної моделі в початковий момент часу прикладення навантаження.

Фундаментальні реологічні властивості у різних ґрунтах проявляються в різних умовах по-різному. При поєднанні цих властивостей пружний початок визначає насамперед оборотність

деформацій, в'язкий - особливість протікання деформацій в часі, пластичний - появу залишкових, необоротних деформацій тільки по досягненні деякого граничного значення напружень. У результаті такого поєднання спостерігаються нові властивості: розгорнуті в часі пружні деформації - пряма і зворотна (при розвантаженні); неоднаковий характер відгуку різних ґрунтів на миттєві і тривалі діючі навантаження та інше.

В розглянутих моделях можна припустити, що реологічні коефіцієнти - модуль пружності, коефіцієнт в'язкості, час релаксації і т.п. - залишаються незмінними в процесі деформування. Такого роду реологічні тіла, що описують ґрунт є фізично лінійними. Однак у реальних ґрунтах у ході деформації при дії РОГМ змінюється структура, зменшується або збільшується щільність, порушуються в тій чи іншій мірі внутрішні зв'язки між частинками і відповідно повинні змінюватися реологічні коефіцієнти, які залежать як від абсолютної величини деформацій, так і від швидкості їх розвитку. Такого роду ґрунти є фізично нелінійними системами, а реологічні рівняння, які їх описують, стають рівняннями зі змінними коефіцієнтами, або квазілінійними рівняннями.

Зазначимо, що більшість задач, пов'язаних з механікою ґрунтів нелінійні як у фізичному, так і в геометричному розумінні, а застосування до дослідження методів лінійної класичної механіки суцільних середовищ пов'язано зі значними похибками і потребують обґрунтованої оцінки такого переходу.

Узагальнене реологічне рівняння, запропоноване Гогенемзером і Прагером [4]:

$$\tau - \tau_T = G_\gamma + \eta\dot{\gamma} - T_p\dot{\tau} = G(\gamma + T_p\dot{\gamma}) - \dot{T}_p\tau \quad (5)$$

дає можливість при рівності нулю деяких параметрів отримати як окремі випадки рівнянь для реологічних моделей ґрунту, так і їх поєднання. Реологічна модель ґрунту, яку розробив А.С. Кушнарєв [6] має очевидні переваги, проте не цілком враховується структура ґрунту, до складу якого входить тверда, рідка і газова фази. Трирівневу структуру ґрунту при цьому представляють макроагрегат, мікроагрегат і його елементарна частинка. З урахуванням елементів пружності, в'язкості і сухого тертя трирівнева реологічна модель ґрунту має вид:

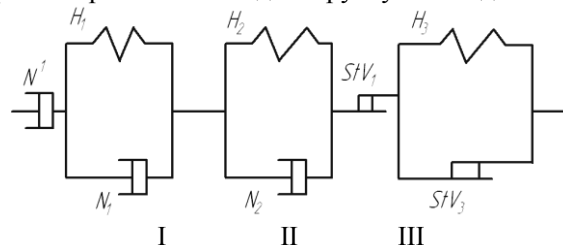


Рис. 1. – Реологічна модель ґрунту, в якій H , N , StV – елементи пружності, в'язкості і сухого тертя; нижні індекси 1, 2, 3 – характеризують I-III структурні складові реологічної моделі (макроагрегат, мікроагрегат, елементарні частинки ґрунту), а верхній індекс – момент прояву елементів.

Зазначимо, що при побудові моделі використані основні положення реології, наведені в роботах [3,4] та обґрунтована структурна формула реологічної моделі і описано процес, що відбувається при зміні НДС ґрунту під впливом дії РОГМ.

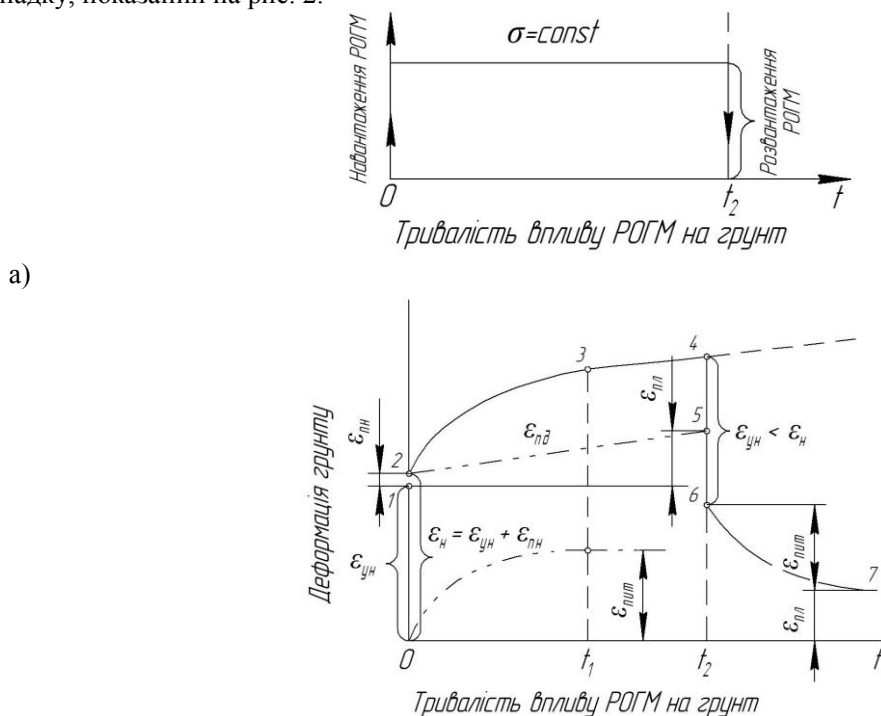
Дослідження показують, що зсувна деформація ґрунту в загальному випадку складається з чотирьох складових: миттєвою оборотною деформацією (пружною); миттєвою залишковою деформацією (необоротною); миттєвою оборотною деформацією (пружною) і тривалою залишковою деформацією (необоротною).

Миттєві деформації протікають з відносно високою швидкістю. Миттєва пружна деформація протікає в ґрунтах зі швидкістю, рівною швидкості поширення пружних коливань. Питання про швидкість миттєвої пластичної деформації в ґрунтах поки досліджено недостатньо. Залишкова деформація ґрунту тим більше по величині, чим більше діюче навантаження. Ця деформація розвивається одночасно з оборотною, і величина її може бути встановлена тільки як різниця між повною і оборотною деформаціями. Миттєва залишкова деформація зсуву чорноземного ґрунту по своїй абсолютній величині тим більше, чим більше різниця між прикладеним зсувним напруженням τ і деякою його величиною τ_n – межею пружності.

Пряма (при завантаженні) тривала пружна деформація, як показали експериментальні дослідження, практично лінійно пов'язана з напруженнями і тому підкоряється принципу незалежності дії сил так само, як і миттєва пружна деформація. Швидкості прямої і зворотної (при розвантаженні) тривалих пружних деформацій з великою точністю підпорядковуються закону в'язкості, і ці деформації можуть бути в'язко-пружними. Вони протікають неоднаково, утворюючи деформаційну петлю гістерезису, і носять ентропійний характер подібно еластичній деформації

матеріалів. Після того як навантаження перевищить межу пружності, частина деформації після розвантаження зберігається, будучи необоротною (пластичною) деформацією. Тривала залишкова деформація протікає зі швидкістю, яка зростає із збільшенням різниці $(\tau - \tau_T)$ між зсувною напруженою τ і межею плинності (τ_T) . Цю частину деформації можна розглядати як деформацію в'язко-пластичної течії. У ґрунтів Кіровоградського регіону $(\tau_T > \tau_{II})$, але чим вище вологість, тим менше різниця $(\tau_T - \tau_{II})$ і тим відносно більше необоротна частка деформації.

Графік зміни в часі навантаження РОГМ на ґрунт і складових повної деформації в загальному випадку, показаний на рис. 2.



а)

б)

Рис. 2. Криві навантаження (розвантаження) ґрунту РОГМ (а) та протікання деформації ґрунту в шарі, прилеглому до РОГМ (б)

При наведеному на ґрунт навантаженні РОГМ (рис. 2, а) можна бачити ділянки наростаючого навантаження, усталеного навантаження та розвантаження.

На графічному відображенні зміни деформації в часі крива 0-4 (рис. 2, б) описує характер зміни деформації при навантаженні РОГМ, що складається з вертикальної ділянки 0-2 миттєвої деформації і ділянки 2-4 тривалої деформації, що протікає, починаючи від точки 3, з майже постійною швидкістю. У момент часу t_2 навантаження припинено. При цьому крива деформації ґрунту 4-7 характеризує зміну його зворотної миттєвої деформації, що складається з ділянки 4-6, і тривалої зворотної пружної деформації після розвантаження, ділянка 6-7.

Крім цього окремо нанесено графік затухаючої тривалої пружної деформації, ділянка 0-1, і прямолінійний (наближений), ділянка 2-5, для тривалої деформації в'язко-пластичної течії в ґрунті. При побудові ділянки графіку 2-5, що проходить через точку 2, тобто кінець відрізка миттєвої деформації, проводиться пряма, яка паралельна графіку деформації на ділянці 3-4. Якщо відкласти по осі ординат від точки 0 відрізок, рівний величині миттєвої пружної деформації при розвантаженні, ділянка (4-6), то отримаємо точку 7, що відсікає величину миттєвої пружної деформації. Різниця ординат точок 2 і 1 дає величину миттєвої пластичної деформації $\epsilon_{пл.д.}$.

Графік зміни деформацій на ділянці 2-5 перетинає криву 4-7 в точці 5. При цьому різниця ординат точок 1 і 5 дає величину повної пластичної деформації $\epsilon_{пл.}$. Таку ж величину має ордината кінцевої горизонтальної ділянки кривої 6-7. Абсцису точки 3 можна розглядати як час t_1 затухання тривалої пружної деформації.

Розглянуті залежності зміни деформації в часі стосуються деформування чорноземного ґрунту при постійній щільності і вологості, тобто як закритої системи. Звісно, що зміни щільності і вологості ґрунту в процесі деформації під час дії РОГМ вносять суттєві відхилення в характер розглянутих графічних залежностей деформації в часі.

При силевій дії РОГМ на пласт ґрунту, елемент якого має об'єм V_e , спостерігаються деформації стискування та розтягу (рис. 3).

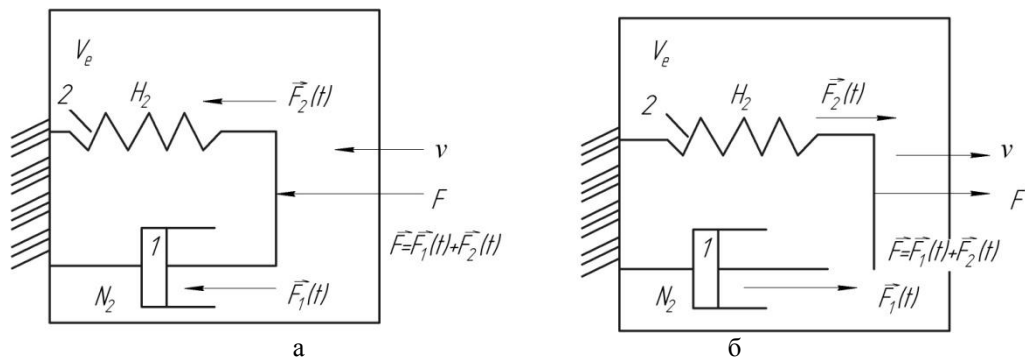


Рис.3. Картина дій сил на елемент об'єму пласта ґрунту при деформації стиску (а) та розтягу (б): 1 – елемент в'язкості (реологічна модель Ньютона) ґрунту; 2 – елемент пружності (реологічна модель Гука)
Аналіз дій сил при різних деформаціях ґрунту можна описати наступними рівняннями напружень:

- при деформації стиску:

$$\tau = \left(\tau_0 \exp\left(-\frac{G_{zc}}{\eta_M + \eta_K} t\right) \right)_I + (G_{zc}\dot{\gamma} + \eta_N\dot{\gamma})_{II} + \left[\frac{2\dot{\gamma}}{\lambda_M} + \left(\frac{2\dot{\gamma}}{\lambda_M} + \eta\dot{\gamma} \right) \right]_{III}; \quad (6)$$

- при деформації розтягу

$$\tau = 0,5 \left\{ \left(\tau_0 \exp\left(-\frac{G_{zc}}{\eta_M + \eta_K} t\right) \right)_I - (G_{zc}\dot{\gamma} + \eta_N\dot{\gamma})_{II} - \left[\frac{2\dot{\gamma}}{\lambda_M} + \left(\frac{2\dot{\gamma}}{\lambda_M} + \eta\dot{\gamma} \right) \right]_{III} \right\}, \quad (7)$$

де τ_0 – початкове напруження зсуву, Н/м²; G_{zc} – модуль зсуву, Н/м²; η_M, η_K, η_N – відповідно, коефіцієнти динамічної в'язкості елементів за реологічними моделями Максвелла, Кельвіна і Ньютона, Па·с; $\dot{\gamma}$ – швидкість деформації, м/с; λ_M – коефіцієнт пропорціональності, Н/м; t – тривалість деформації, с.

Характер динаміки зміни напружень в процесі деформацій стиску та розтягу елемента ґрунту у вигляді графіків наведено на рис.3.

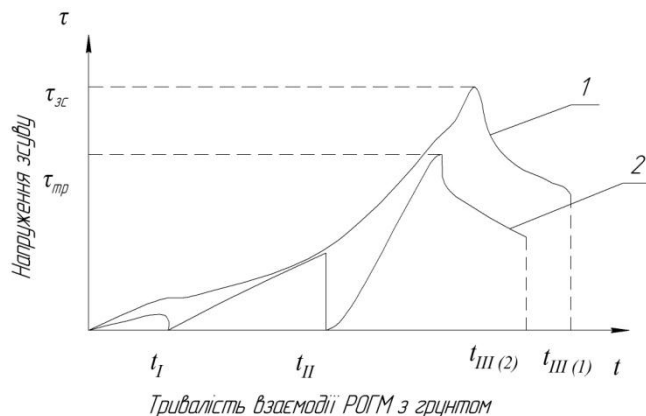


Рис. 4 – Схема характеру зміни напруження в об'ємі елемента ґрунту шару, прилеглого до РОГМ, в процесі деформацій стиску (крива 1) і розтягу (крива 2)

Можна бачити, що руйнування ґрунту при деформації розтягу відбувається при меншій нарузі, ніж при деформації стиску. Це свідчить про те, що енергетичні витрати при дії РОГМ на ґрунт на основі деформації розтягу значно менші, ніж на основі деформації стиску.

Наведені реологічні рівняння та їх графічні інтерпретації показують, що в'язкість ґрунту знижується при збільшенні кількості видавлюваної рідкої фази при підвищенні тиску, тобто в'язкість ґрунту в процесі дії РОГМ не є постійною величиною. Процеси стиску і розтягу елементів ґрунту супроводжуються зміною структури від макроагрегатів до елементарних частинок, в'язкість яких неоднакова. Для таких систем В. Оствальдом [5] було введено поняття структурної в'язкості. Зміна в'язкості ґрунту в процесі його деформації свідчить про те, що відбувається зростання швидкості зсуву між дисперсною фазою і середовищем ґрунту, тобто, взаємодія між ними знижується. Знижують в'язкість ґрунту і деформації, що викликають в частинках розрив та їх руйнування.

При дії РОГМ на такий ґрунт змінюється структура, змінюється щільність і в'язкість. Залежність напруження зсуву ґрунту в такому випадку набуває вигляду:

$$\tau = \eta_{\text{стр}} (\dot{\gamma})^n \quad (8)$$

$\eta_{\text{стр}}$ – коефіцієнт структурної в'язкості, Па·с; n – коефіцієнт часу релаксації.

З точки зору класичної реології [2] ґрунт може змінювати свій стан від рідкоподібного до дуже твердого і його доцільно обробляти в стані стиглості при вологості 18...28%. В'язкість при цьому є важливим технологічним параметром обробітку ґрунту. Структурна в'язкість ґрунту має велике значення і для зниження енергоємності його обробітку. На початковому етапі обробітку структура ґрунту не спотворена і ґрунт має максимальну в'язкість, але на кінцевій стадії обробітку структура ґрунту спотворена і його в'язкість вже буде мінімальною.

Враховуючи характер руйнування ґрунту при деформації стиску і розтягу, енергоємність процесу, а також зміну реологічних характеристик дії РОГМ на ґрунт можна вважати, що для ефективного обробітку ґрунту більш доцільні є комбіновані РОГМ та РОГМ зі змінними формою та геометрією поверхонь ковзання. Крім цього в якості позитивної рекомендації є необхідність в попередньому розпушування ґрунту, тобто зменшенні його в'язкості.

Висновки

Дослідження показали, що ґрунт не є простим набором твердих частинок, а являє собою систему матеріальних частинок, що взаємодіють між собою за фізичними законами, які необхідно врахувати при розробці нових енергозберігаючих технологій обробітку ґрунту.

Величина і напрям руйнівної сили в умовах швидкісного режиму руху РОГМ та деформації стиску мають стохастичну природу, а тому при цьому доцільним є оцінка енергії, що витрачається на обробітку ґрунту. У випадку деформації стиску ґрунту вимагається збільшити швидкість руху сучасних РОГМ, що в свою чергу збільшить енергоємність обробітку ґрунту, тобто потрібні способи обробітку ґрунту і така конструкція РОГМ, що базуються на інших принципах дії на ґрунтовий пласт, що прилягає до РОГМ, відмінних від його стиску.

Реологічна модель ґрунту відображає його трирівневу і багатофазну структуру, враховує структурну в'язкість та дає можливість сформувати підхід щодо дії РОГМ на ґрунт, що базується на деформації розтягу ґрунтового пласта і зниженні енергетичних витрат на його обробітку.

Показано, що в'язкість ґрунту є величиною змінною і на початковому етапі механічної дії РОГМ на ґрунт має максимальну величину, а по завершенню процесу обробітку, коли структура ґрунту порушується, вона стає мінімальною. Розглянуті реологічні властивості і характеристики можна використати в якості теоретичних основ розробки комбінованих РОГМ та РОГМ зі змінною формою і геометрією поверхонь ковзання ґрунту, а також енергозберігаючих технологій, що передбачають попереднє розпушування ґрунту, а отже зміну його НДС і характеру деформації ґрунту зі стиску на розтяг.

Список літературних джерел

1. Аулін В.В. Врахування реологічних властивостей ґрунтів при їх взаємодії з РОГМ/В.В. Аулін, А.А. Тихий// Зб. наук. праць Кіровоградського національного технічного університету /техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація/–вип. 22. – Кіровоград: КНТУ, 2009. – С. 291-296
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов./ С.С. Вялов.- М. Высш. школа, 1978. - 447 с.
3. Библик Е.Е. Реология дисперсных систем/Е.Е. Библик. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981.- 172 с.
4. Рейнер М. Реология /М. Рейнер. Пер. с англ. Н.И. Малинина, под. ред. Є.И. Григолоука. – М.: Наука, 1965. – 223с.
5. Мамбеталин К.Т. Реологическая модель почв // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006. – № 5. – с.
6. Кушнарєв А.С. Механико-технологические основы обработки почвы/ А.С. Кушнарєв, В.И. Кочев. - Киев.: Урожай, 1989. -144 с.
7. Аулін В.В. Характеристика ґрунту як елементу трибосистеми "РОГМ-ґрунт" та реологічне обґрунтування його взаємодії з РОГМ /В.В. Аулін//Вісник інженерної академії України. – 2013.- №1. С.104-109