

УДК 621.891:631.31

М.І. Черновол, д.т.н.
В.В. Аулін, к.ф.-м. н.
А.А. Тихий**ХАРАКТЕР ЗМІНИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ҐРУНТУ ПІД ЧАС ЙОГО ВЗАЄМОДІЇ З РОБОЧИМ ОРГАНОМ**Кіровоградський національний технічний університет, e-mail: aulin52@mail.ru

В статті досліджено характер зміни напружено-деформованого стану ґрунту, його вплив на якість та енергоємність процесу обробітку робочим органом. Побудована модель взаємодії робочого органу з ґрунтовим середовищем з урахуванням його багатофазності і полідисперсності.

Ключові слова: ґрунт, робочий орган ґрунтообробних машин, реологічна модель, напружено-деформований стан, опір ґрунту, щільність ґрунту.

Вступ

Опір деформації, кришенню і енергоємність процесу обробітку ґрунту в значній мірі визначаються явищами, що протікають при русі вирізаного з масиву ґрунту пласта по поверхні робочого органу. Одним з складних питань при цьому є опис напружено-деформованого стану (НДС) ґрунту під час обробітку його робочим органом [2-4].

Для досягнення необхідної якості обробітку ґрунту залежно від її початкового стану необхідно розробляти робочі органи, конструктивні параметри, оптимізація яких дозволяє змінювати ступінь дії на ґрунт і забезпечувати управління процесом роботи. При цьому, додаткові витрати на підвищення якості обробітку ґрунту за рахунок зміни ступеню дії на пласт і його кінематики повинні бути виправдані з енергетичної і економічної точки зору.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Оскільки можливі типи РОГМ є модифікаціями простого і косоного клинів [1], під дією якого ґрунт може піддаватися різним деформаціям: розтягу, стиску, зсуву, вигину і крученню, то в ньому виникає складний НДС. Більшість фахівців вважають, що НДС ґрунту підкоряється гіпотезі Кулона – Мора, відповідно до якої руйнування ґрунту відбувається під дією дотичного напруження, гранична величина якого є функцією нормального напруження, що діє по площині зсуву. Досліди не завжди підтверджують закономірності цієї гіпотези. Сухий ґрунт руйнується шляхом сколювання по лінії випереджаючої тріщини, що виникає перед різальним елементом (РЕ) РОГМ під впливом його локального змінання. Проте в більшості випадків при обробітку ґрунту клиновидними РОГМ спостерігається руйнування переважно стисненням, і процес стає більш енергоємнішим (у 10...20 разів), ніж при деформації розтягу. Крім того, внаслідок переущільнення виникають брили, на руйнування яких необхідно витратити додаткову енергію.

Дослідження, проведені Виноградовим В.І. [5] і Ветохіним В.І. [7], встановили, що краща якість обробітку ґрунту і менша енергоємність процесу спостерігається при використанні РОГМ із змінною кривизною робочої поверхні, причому нижня частина повинна бути увігнутою, а верхня - опуклою. При русі по такому робочому органу ґрунт зазнає змінну деформацію спочатку на стиснення, потім на розтягування. Для підвищення здатності кришення, А.С. Кушнар'єв запропонував виконувати робочу поверхню лап і РЕ хвилястими, такими, що викликають при русі багатократний вигин пласта ґрунту в поперечному напрямі [8]. Пласт при цьому піддається змінному стиску і розтягу, що покращує кришення при менших енергетичних витратах. В цьому напрямі дослідження на увагу заслуговують розробки С.М. Капова [6].

Відомо, що при накладенні деформацій різних знаків межа пружності ґрунту знижується, тобто спостерігається ефект Баушинґера [1,8]. Використовувати деформацію розтягу при механічній обробці ґрунту в чистому вигляді поки ще не вдалося.

Кінематичний аналіз руйнування пласта ґрунту на робочій поверхні РОГМ із змінною кривизною дозволив виявити зменшення енергоємності кришення від зниження швидкості деформації і її різнонаправленості [4,7].

Оскільки механічна міцність ґрунту визначається кількістю площинок контакту частинок ґрунту між собою, то навантаження реальних ґрунтів з неоднорідними властивостями в різних

точках контактів приводить до локальних руйнувань в тих місцях, де напруження рівне міцності міжагрегатних зв'язків. В цьому випадку міцність оброблюваного пласта ототожнюється з руйнуванням його найслабшої локальної області.

При дії на ґрунт змінних навантажень в ній виникають хвилі напружень. У місцях тріщин або інших локальних порушень суцільності ці хвилі дифрагують, викликаючи локальні підвищення напружень в ґрунті.

Природа руйнування ґрунту під дією імпульсних навантажень поки ще не зрозуміла. В.В. Кацігін [8] вважає, що руйнування при цьому відбувається при певній кількості енергії, поглинутої одиницею об'єму ґрунту. Отже, будь-які фізичні ефекти, що супроводжуються перенесенням енергії, і здатні порушити в ґрунті хвилі напружень, можуть привести його до руйнування.

На думку О.М. Гудкова [10], при імпульсному навантаженні величина деформації ґрунту повинна перевищувати межу її пружної деформації.

Характерним є те, що руйнування реальних ґрунтів при змінних навантаженнях відбувається при напрузі, значно меншій, ніж значення межі міцності при статичних навантаженнях [5].

Дослідження показують, що порівнюючи природну об'ємну масу ґрунту з оптимальною можна визначити раціональний спосіб обробітку і ступінь дії на ґрунт.

Постановка завдання

Використовуючи РОГМ для обробітку ґрунту необхідно враховувати зміну НДС ґрунту та ряд фізичних ефектів, що при цьому розвиваються, особливо це стосується використання концентраторів напружень і видів деформацій з метою зниження витрат енергії та якісного обробітку ґрунту.

Основна частина

Основною задачею обробітку ґрунту є зміна його стану шляхом переходу фізико-механічних властивостей з початкового стану в оптимальний. Процес переходу відбувається за допомогою простої механічної дії на ґрунт РОГМ, що переміщається в ґрунті і порушує її початкову структуру. Оскільки результатом обробітку є нерівноважний стан ґрунту, то процес обробки ґрунту - це підведення до нього деякої кількості енергії з метою зміни властивостей і досягнення оптимального складу.

Збільшення щільності грудок, що можуть утворитися при обробітку, відбувається у зв'язку з тим, що в процесі взаємодії РОГМ з ґрунтом в нижніх шарах утворюється ядро ущільнення. Ущільнене ядро в процесі взаємодії видавлюється між ґрунтом і робочим органом і спостерігається постійний підйом ущільненого шару ґрунту на поверхню під час руху робочого органу. Об'ємна маса в ґрунтового ядрі в 1,3...1,5 разів вище, ніж в непорушеному шарі ґрунту. Ядро ущільнення і ущільнений шар ґрунту є основними чинниками утворення перед поверхнею робочих органів ущільнених грудок і локальної області. Утворення переущільнених глин вимагає додаткового кришення ґрунту, а отже і витрат додаткової енергії.

Для опису НДС ґрунту та його зміни використовують загальну теорію механіки суцільних середовищ [9], яка вимагає врахування наступних чинників: зовнішнє навантаження передається від однієї частини ґрунтового середовища до іншої лише через механізми взаємодії, тобто через точки контакту довільно розташованих частинок; окремі фази ґрунту по-різному чинять опір силовим діям РОГМ і впливають на деформацію ґрунту; ґрунтам властиві неоднорідність будови і широкий діапазон зміни властивостей; НДС ґрунту залежить від швидкості розповсюдження напружень і деформації з плином часу; ґрунт є складною поліфункціональною, полідисперсною, чотирифазною, гетерогенною, відкритою структурною системою [2,4], яка знаходиться в стані постійного обміну речовиною й енергією з навколишнім середовищем і руйнується в процесі деформації; в процесі взаємодії ґрунту з РОГМ безперервно змінюється його щільність.

Діючи РОГМ на ґрунтовий пласт в ньому спостерігається характерний розвиток одночасно декількох тріщин. Щоб управляти ступенем кришення ґрунту, а отже якістю його обробки, необхідно здійснювати сприяння розповсюдження цих тріщин по всій товщині пласту.

Авторами проведено серію експериментів на круговому стенді з ґрунтами різного механічного складу і властивостями. Виявлено, що процес тріщиноутворення є багатоетапним і періодично повторювальний. На початковому етапі мікротріщини можуть виявити нездатність

до подальшого розповсюдження: величина напруження в ґрунті може бути малою для їх розповсюдження (малі кути різання), а також умови їх розповсюдження можуть бути ускладнені особливостями структури ґрунту (наявність рослинних залишків).

В процесі взаємодії РОГМ з ґрунтовим елементом останній зазнає певну деформацію, постійно змінюються величина навантаження і об'ємна маса. Деформація щільного ґрунту при низькому рівні напружень приводить до збільшення об'єму, тобто його дилатації (об'ємного розширення). Оскільки в місцях, де об'єм збільшується, ґрунт стає менш щільним, що сприяє подальшій деформації і збільшенню об'єму, то процес є нестабільним. Це свідчить про те, що деформації в ґрунті можуть концентруватися, що приводить до появи поверхонь зламу. Уздовж поверхонь зламу проходять дуже тонкі дилатаційні смуги, що відрізняються за властивостями від основної маси ґрунту. Деформація в дилатаційних смугах більша за величиною у випадках руйнування при зсуві, чим руйнуванні при розтязі, оскільки враховуються процеси тертя.

При взаємодії РОГМ з ґрунтом можна виділити три види деформацій ґрунту:

- деформація в мікромасштабі - в межах дилатаційних смуг уздовж поверхні зламу;
- взаємне перекочування і ковзання ґрунтових часток, що утворилися;
- деформація в межах ґрунтових часток, яка можлива завдяки високій вологості ґрунту.

В перших двох випадках деформація супроводжується збільшенням об'єму, в останньому - може відбутися і ущільнення ґрунтових часток. Тому в процесі взаємодії РОГМ з ґрунтом можна виділити ще й такі деформації: при постійному об'ємі; при ущільненні; при розширенні в процесі руйнування. У польових умовах загальна деформація ґрунту складається з сукупності її різних видів, але один з них є провідним [5,8].

При описі взаємодії РОГМ з пластом ґрунту цілком прийнятні теорії суцільних середовищ, що деформуються. Такий підхід дозволяє описати процес деформації, переміщення і перемішування частинок ґрунту по робочій поверхні РОГМ. Без дослідження цих процесів неможливо встановити закономірності взаємодії РОГМ з ґрунтом й описати НДС ґрунту.

Вирішення рівнянь динаміки суцільних середовищ вимагає чіткого визначення початкових і граничних умов. Граничні умови при русі РОГМ в ґрунтовому середовищі повинні виконуватися в області контакту з його поверхнею (рис. 1). Вони можуть бути отримані з умови непроникності:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_t}{\partial z} \Big|_{z=z_t} &= 0. \\ \frac{\partial v_t}{\partial x} \Big|_{x=x_t} &= 0. \end{aligned} \right\} (1)$$

Гранична умова поділу середовища і повітря визначається як $p_{zp}=0$.

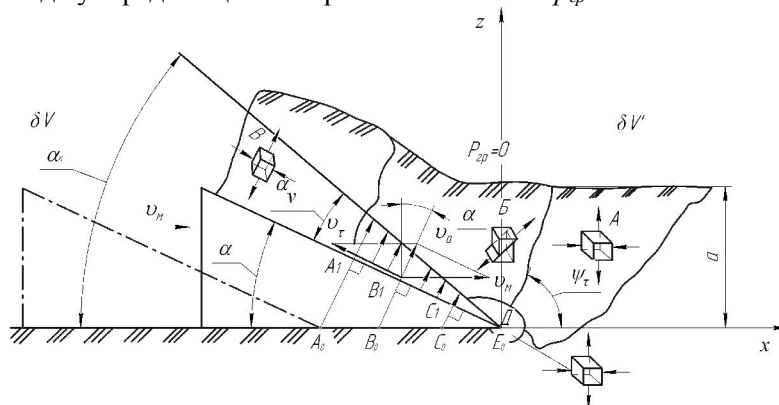


Рис.1. Початкові і граничні умови взаємодії РОГМ з ґрунтом.

В якості початкових умов необхідно задати значення швидкості і тиску в області далекої від взаємодіючого РОГМ. Граничні умови при рішенні задачі механічної дії РОГМ на ґрунт є описом його геометричних і технологічних параметрів процесу обробки, початкові умови - властивостей ґрунтового середовища.

Враховуючи початкові і граничні умови, можна розв'язати основне рівняння руху ґрунтового середовища.

Модель взаємодії РОГМ з ґрунтом повинна враховувати багатофазність і полідисперсність ґрунтового середовища. Основною проблемою подолання труднощів по їх врахуванню є наближений підхід, що полягає в збереженні для суміші складових в цілому рівняння реології однорідного, ньютонівського або неньютонівського середовища, фізичні константи якого в

середньому враховують особливості окремих складових неоднорідної суміші. Для ґрунтових середовищ широко поширено застосування поправки Ейнштейна [9] до динамічного коефіцієнта в'язкості несучої фази. Виправлений динамічний коефіцієнт в'язкості суміші η_c подається через відповідні коефіцієнти: η_T - для твердої фази; $\overline{\eta_{p,e}}$ - для рідкої або газоподібної

$$\text{домішки з сферичною формою частинок: } \frac{\eta_c}{\eta_0} = 1 + \alpha \frac{\eta_T + \frac{5}{2}\eta_{p,e}}{\eta_T + \eta_{p,e}}; \quad (2)$$

де α — об'ємна частка твердої складової ґрунта. У разі домішок несферичних частинок в'язкість суміші зростає і для твердих частинок, що мають неправильну форму, можна записати

$$\eta_c = \eta_T(1 + 5\alpha) \quad (3)$$

Для ґрунту, що складається з твердих частинок, води і повітря з об'ємною концентрацією твердих включень $\alpha=50\dots70\%$, матимемо $\eta_c = (3,5\dots4,5)\eta_0$.

Найбільш важливою при обробі ґрунту РОГМ є зміна його щільності ρ_r від початкового значення. При зменшенні щільності ґрунту відбувається її спущення, при збільшенні - ущільнення. Тому на основі зміни щільності можна оцінити ступінь дії РОГМ на ґрунт. При взаємодії з РОГМ маса ґрунту, що залучена до руху $\delta m = \rho_r \delta V$, зберігається:

$$\frac{d}{dt}(\delta m) = \frac{d\rho_r}{dt} \delta V + \rho_r \frac{d}{dt}(\delta V) = 0, \quad (4)$$

де $\delta V = \delta x \delta y \delta z$ - елементарний об'єм ґрунту.

Швидкість зміни відносного об'єму ξ_v ґрунту постійної маси за час деформації dt дорівнює:

$$\xi_v = \frac{\delta V' - \delta V}{\delta V dt} = \frac{1}{\delta V} \left[\frac{d}{dt}(\delta V) \right], \quad (5)$$

$$\delta V' = \delta x' \delta y' \delta z' = (1 + \dot{\epsilon}_x dt) \delta x \cdot (1 + \dot{\epsilon}_y dt) \delta y \cdot (1 + \dot{\epsilon}_z dt) \delta z; \quad (6)$$

$\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y, \dot{\epsilon}_z$ - відповідно кутова швидкість зміни розмірів об'єму по координатних осях.

При знехтуванні нескінченно малими приростами об'єму залежність набуде вигляду:

$$\xi_v = \dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \text{div } v, \quad (7)$$

тобто дивергенція вектора швидкості v визначає швидкість відносної зміни об'єму ґрунту в даній точці поля швидкостей. Враховуючи постійність маси ґрунту, залученого до руху в процесі деформації РОГМ, зміна дивергенції вектора швидкості $\text{div } v$ визначить зміну щільності ґрунту згідно рівняння:

$$\frac{d\rho_r}{dt} + \text{div}(\rho_r v) = 0. \quad (8)$$

У випадку стаціонарності поля щільності $\partial \rho_r / \partial t = 0$, маємо:

$$\text{div}(\rho_r v) = 0, \quad (9)$$

або в проєкціях швидкості на координатні осі:

$$\frac{\partial(\rho_r v_k)}{\partial k} = \frac{\partial(\rho_r v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_r v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_r v_z)}{\partial z} = 0. \quad (10)$$

На відміну від нестискуваного середовища щільність реального ґрунту при дії на нього РОГМ може як збільшуватися, так і зменшуватися. В цьому випадку рівняння збереження маси ґрунту набуває вигляду:

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho v) = M. \quad (11)$$

Для врахування цього рівняння в динаміці ґрунтових елементів необхідно визначити зміну щільності ґрунту у міру його переміщення по РОГМ. Розглядаючи ґрунтове середовище як сукупність матеріальних частинок, між якими виникають внутрішні сили взаємодії, можна розв'язати основну задачу динаміки суцільних середовищ, тобто визначити за заданих

зовнішніх сил рух кожної частинки і внутрішні сили в кожній точці середовища в кожен момент часу:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_x}{\partial z} v_z = F_x - \frac{1}{\rho_\Gamma} \frac{\partial p_\Gamma}{\partial x}; \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_y}{\partial z} v_z = F_y - \frac{1}{\rho_\Gamma} \frac{\partial p_\Gamma}{\partial y}; \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial v_z}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_z}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_z}{\partial z} v_z = F_z - \frac{1}{\rho_\Gamma} \frac{\partial p_\Gamma}{\partial z} \end{cases} \quad \frac{d\rho_\Gamma}{dt} + \operatorname{div}(\rho_\Gamma v) = M \quad (12)$$

Останнє рівняння системи (12) є простим прикладом рівняння реології ґрунтового середовища, що зв'язує компоненти тензора напруження, деформацій і їх похідних за часом. Такі рівняння можуть бути однаковими при різноманітних рухах даного середовища, або залежати від характеру різних можливих його рухів, та форми робочої поверхні РОГМ.

У реальному ґрунтовому середовищі між частинками ґрунту виникають і сили внутрішнього тертя, що приводить до виникнення дотичного напруження в зоні деформації. В цьому випадку рівняння реології визначається як співвідношенням між дотичною компонентою тензора напруження (тертя) і поперечною до напрямку потоку похідної швидкості зсуву.

У випадку прямолінійного, здвигового руху за законом Ньютона, маємо:

$$p_{ij} = \begin{cases} \eta_c \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \text{ при } j \neq i; \\ -p + 2\eta_c \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \text{ при } j = i, \end{cases} \quad (13)$$

тобто спостерігається лінійний зв'язок між тензором напружень і тензором швидкостей деформацій, для ізотропного середовища.

З урахуванням зазначеного, а також формул (3) і (13) система рівнянь (12) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_x}{\partial z} v_z &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + (1 + 5\alpha) \left(\eta_T \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \eta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right); \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_y}{\partial z} v_z &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + (1 + 5\alpha) \left(\eta_T \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \eta_T \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right); \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial v_z}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_z}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_z}{\partial z} v_z &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + (1 + 5\alpha) \left(\eta_T \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \eta_T \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right); \\ \frac{d\rho}{dt} + \operatorname{div}(\rho v) &= M. \end{aligned} \quad (14)$$

В згорнутій формі маємо:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_i}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_i}{\partial z} v_z = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial i} + (1 + 5\alpha) \eta_T \nabla^2 v_i, \quad i = x, y, z; \\ \frac{d\rho}{dt} + \operatorname{div}(\rho v) = M, \end{cases} \quad (15)$$

де α - коефіцієнт вмісту твердих частинок в об'ємі ґрунту $\alpha = 0,3 \dots 0,7$;

$$\nabla^2 v_i = \frac{\partial^2 v_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial z^2} - \text{лапласиан швидкості деформацій.}$$

Система рівнянь (15) є рівнянням динаміки багатофазного ґрунтового середовища, що стискається. Інтегрування цієї системи рівнянь дозволяє визначити векторне поле швидкостей, скалярне поле тиску для кожного моменту часу і траєкторії руху частинок ґрунту.

Розв'язати систему можна і чисельним кінцево-об'ємним методом за допомогою пакетів прикладних програм на ПЕОМ. В якості початкових умов задають щільність, в'язкість і швидкість переміщення середовища.

Геометричні параметри РОГМ визначаються при окремій побудові. Спроектований РОГМ імпортується в середовище прикладної програми, де визначається область розрахунку, під якою розуміють об'єм, в якому визначено систему рівняння, як математичну модель взаємодії РОГМ з ґрунтом.

Висновки

Побудована модель процесу взаємодії РОГМ з ґрунтом дає можливість отримати об'ємну картину деформації ґрунтового середовища. В процесі розрахунків визначаються значення швидкостей частинок ґрунтового середовища, розподіл тиску перед РОГМ і, безпосередньо на ньому, траєкторії руху частинок, епюри тиску на РОГМ, а також значення сил і моментів, що діють на нього. Для розрахунку можна змінювати фізичні параметри ґрунтового середовища (щільність, в'язкість), початкову швидкість руху РОГМ і його технологічні параметри.

Можна також встановити характеристики деформації, переміщення і перемішування ґрунту, силову навантаженість РОГМ. Отримані характеристики дозволяють розробити рекомендації по оптимізації геометричних і технологічних параметрів РОГМ для отримання необхідних агротехнічних вимог і зниження енергоємності обробки ґрунту.

Список літературних джерел

1. Горячкин В.П. Собрание сочинений./В.П. Горячкин.- М.: Колос, 1965. Т.1.- 720 с.
2. 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
3. Аулін В.В. Динаміка зміни напруженого та зносного стану РЕ РОГМ при різних варіантах зміцнення/ В.В. Аулін, В.М. Бобрицький, А.А. Тихий // Проблеми трибології (Problems of tribology). Хмельницький. ХНУ, 2010. – №3 – С.54-59
4. Аулін В.В. Напружено-деформований стан ґрунту при його взаємодії з різальними елементами робочих органів ґрунтообробних машин/ В.В. Аулін, В.М. Бобрицький, А.А. Тихий// Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки.- Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2009. №3.-С. 6-17
5. Виноградов В.И. Деформация почвы под воздействием рабочего органа культиватора-плоскореза/ В.И. Виноградов, Н.В. Иванов // Тр. / ЧИМЭСХ / Эксплуатация и обслуживание машинно-тракторного парка: вып. 100. Челябинск, 1975, с.32-39.
6. Капов С.Н. Схемы, критерии и теории разрушения почвы/ С.Н. Капов // Вестник ЧГАУ. Т.32, Челябинск, 2000, с. 15-20.
7. Ветохин В.И. Малоэнергоемкие рыхлители почвы: экспериментальная оценка рационального профиля /В.И. Ветохин//Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1993. №7, с. 15-17
8. Кушнарев А.С. Механико-технологические основы обработки почвы/ А.С. Кушнарев, В.И. Кочев. - Киев.: Урожай, 1989. -144 с.
9. Панов А.И. Физические основы механики почвы/ А.И. Панов// Науч.тр. / ВИМ. Т.131,2000, с. 46-51.
10. Гудков А.Н. Теоретические основы скоростной обработки солонцовых почв/А.Н. Гудков//Вестник сельскохозяйственной науки, 1960.№1. с.20-25.