

УДК 624.132.1

Реологічна модель руйнування ґрунту робочими органами зі структурованим рухом різальних елементів

Олександр Костенюк¹, Анатолій Фомін², Олександр Тетерятник³, Галина Боковня⁴

Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський просп. 31, Київ, Україна, 03037

¹kostenyukOO@i.ua, orcid.org/0000-0002-3281-6747

²fomin.av@knuba.edu.ua, .org/0000-0002-5990-4384

³tetryatnik@ua.fm, orcid.org/0000-0002-9983-0551

⁴bokovnaj@ua.fm, orcid.org/0000-0001-6286-8620

Отримано 18.01.2018; прийнято 15.02.2018

DOI: 10.26884/gbdmm1891.0401

Анотація. Інтенсифікація робочих процесів машин для земляних робіт є одним із основних факторів збільшення їх ефективності.

Інтенсифікація робочих процесів при розробці робочих середовищ, що представлені ґрунтами, відбувається за рахунок ударного, вібраційного, віброударного та високошвидкісного прикладання навантаження на робоче середовище. При цьому в ґрунті відбуваються складні деформаційні процеси, що протікають з різними перетвореннями енергії, яка передається ґрунту від робочих органів ґрунторуйнуючих машин.

При деформуванні і руйнуванні ґрунтів останні виявляють пружні, пластичні і в'язкі властивості. Крім того, окрім внутрішнього руху в робочих середовищах відбуваються процеси зовнішнього тертя між різальними елементами і ґрунтом. В загальному плані ґрунти мають трифазну будову, особливістю якої є те, що крім твердих частинок в його об'ємі знаходиться вода, розчини солей і гази.

Для опису процесів формування потоків енергії і її перетворення при руйнуванні ґрунтів застосовуються два методи математичного моделювання. За першого методу при описі процесів використовуються методики, засновані на застосуванні теорії пружності і пластичності суцільних середовищ. Другий метод заснований на застосуванні феноменологічних механореологічних моделей.

Внаслідок того, що процеси динамічного руйнування робочого середовища протікають в просторі і часі, механореологічна модель висо-

кошвидкісного руйнування ґрунтів повинна описувати зміни характеру деформацій і напружень в кожній точці контакту різального елемента з ґрунтом, а також кількісну і якісну залежності напружено-деформованого стану від швидкості навантаження і часу протікання процесів деформування робочого середовища.

Ключові слова: інтенсифікація робочих процесів, реологічна модель, високошвидкісне руйнування, напружено-деформований стан.

ВСТУП

Інтенсифікація руйнування робочих середовищ за рахунок високих швидкостей різання має низку переваг, що полягають у відносно простому робочому русі різальних елементів, достатньо простому приводі машин, реалізації динамічного навантаження на робоче середовище.

Взаємодія різальних елементів з ґрунтом за умов високошвидкісного різання відбувається зі змінними геометричними, кінематичними і силовими параметрами. При цьому ця взаємодія має просторовий характер, де характеристики взаємодії змінні кількісно і якісно в різних ділянках напружено-деформованого стану ґрунту в зоні різання. Тобто, відгук робочого середовища на навантаження диференційований у просторі і часі [1].

При деформаціях середовищ відбувається взаємний рух частинок ґрунту відносно одна одної, при цьому енергія, яка витрачається на деформування, перетворюється в теплову та потенціальну енергію нових утворень ґрунтової маси [2, 3].

МЕТА РОБОТИ

Мета роботи полягає в моделюванні процесів різання і ударного руйнування ґрунтів із структурованим рухом робочих органів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для опису процесів формування потоків енергії та її перетворення при руйнуванні ґрунтів застосовуються два методи математичного моделювання. За першого методу опису процесів, що протікають при руйну-

ванні робочих середовищ, використовуються методики, засновані на застосуванні теорії пружності і пластичності суцільних середовищ. Цей метод є універсальним, але становить значну складність, тому що призводить до необхідності розв'язання систем рівнянь в частинних похідних. Другий метод заснований на застосуванні феноменологічних механореологічних моделей, який дає можливість скласти математичні моделі процесів руйнування робочих середовищ за допомогою звичайних диференціальних рівнянь. Такий метод менш універсальний, потребує більш детального аналізу конструктивних умов взаємодії різальних елементів з робочим середовищем, але є менш трудомістким.

При деформуванні і руйнуванні ґрунти виявляють пружні, пластичні і в'язкі властивості. Основні види реологічних моделей наведено в Табл.1 [4].

Таблиця 1. Основні види реологічних моделей

Table 1. The main types of rheological models

Середовище, що моделюється	Реологічна модель		Найменування моделі
	механічна форма	математичний запис	
1	2	3	4
Пружне		$\sigma = \varepsilon E$ $\tau = xG$	Гука
Пластичне		$\tau = \tau_{\text{пл}}$	Сен-Венана
Пружно-пластичне		$\tau = \tau_{\text{пл}}$ $\tau = xG$	Прандтля
В'язке		$\tau = \eta \frac{dV}{dz}$	Ньютона
Пружно-в'язке з релаксацією напруження		$\tau = \eta \frac{dV}{dz}$ $\tau = xG$	Максвелла

1	2	3	4
Із запізнюванням деформацій		$\tau = xG + \eta \frac{dV}{dz}$	Фойгта
З явищем повзучості		$\tau = xG;$ $\tau = x_1G_1 + \eta \frac{dV}{dz}$	Кельвіна
Пружно-в'язко-пластичне		$\tau = xG;$ $\tau = x_1G_1 + \tau_{пл}$	Бінгама
Пружно-в'язко-пластичне з релаксацією		$\tau = xG;$ $\tau = x_1G_1 + \tau_{пл}$ $\tau = \tau_{пл} + \eta \frac{dV}{dz}$	Шведова
Ґрунт в процесі зсувної деформації		$\tau = xG;$ $\tau = x_1G_1 + \eta \frac{dV}{dz}$ $\tau = \tau_{пл} + \eta_1 \frac{dV}{dz}$	Узагальнена Кельвіна і Шведова

Наведені в Табл. 1 реологічні моделі описують процеси квазістатичного навантаження і руйнування робочих середовищ.

За інтенсифікації процесу руйнування робочих середовищ корінним чином змінюються властивості робочого середовища. Це відбувається як в кількісному, так і в якісному сенсі. Однак, в існуючих реологічних моделях ці зміни зводяться до врахування інерційних властивостей робочого середовища за динамічного прикладання навантаження.

На Рис. 1 представлені моделі пружно-інерційних тіл [4]. Виходячи з особливостей процесів, що протікають при інтенсифікації руйнування робочих середовищ, для складання реологічної моделі динамічного руйнування робочих середовищ необхідний інший підхід, за якого в моделях розробляються нелінійні коефіцієнти, що враховують комплекс змін в системі «робочий орган – середовище». Крім того, реологічні моделі враховують інтегральний відгук робочого середовища на навантаження.

Наприклад, представлена на Рис. 2 феноменологічна модель ущільнення ґрунту штампом [4] усереднено враховує деформації і напруження при навантаженні робочого середовища і не враховує їх зміну в межах поперечного перерізу контакту штамп з ґрунтом.

Внаслідок того, що процеси динамічного

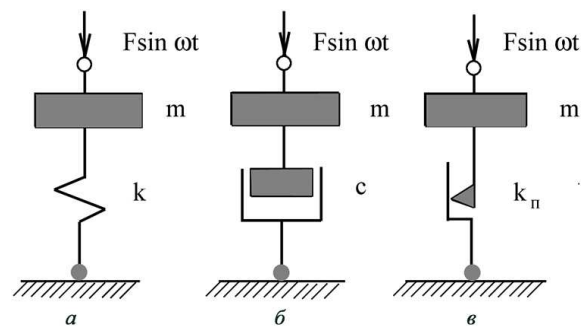


Рис. 1. Моделі пружно - інерційних тіл: *a* – пружно-інерційна; *b* – в'язко-інерційна; *v* – пластично-інерційна

Fig. 1. Models of elastic inertia bodies: *a* - elastic inertia; *b* - viscoinertion; *v* - plastic-inertial

руйнування робочого середовища протікають в просторі і часі, механореологічна модель високошвидкісного руйнування робочих середовищ повинна описувати зміни характеру деформацій і напружень в кожній точці контакту різального елемента з ґрунтом, а також кількісну і якісну залежності напружено-деформованого стану від швидкості навантаження і часу протікання процесів деформування робочого середовища.

Трифазною будовою ґрунтів в значній мірі визначається їх міцність і опір механічним діям. На властивості, особливо глинистих, ґрунтів значно впливає вода. Міцність в широкому сенсі є властивість твердих тіл опиратися руйнуванню (розділеного на частини), а також незворотній зміни форми (пластичній деформації) під дією зовнішніх навантажень. Природа міцності ґрунтів визначається потенціальною енергією одного з чотирьох типів фундаментальних взаємодій – електромагнітної взаємодії між молекулами і атомами речовини, що складає даний ґрунт.

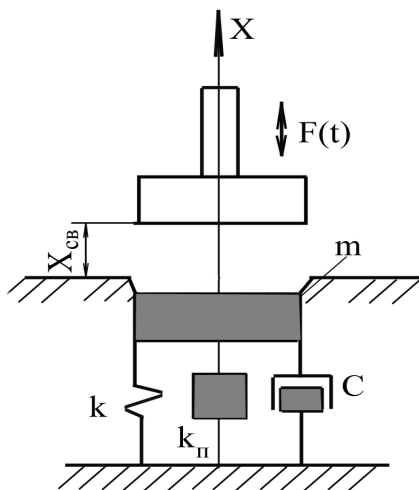


Рис. 2. Феноменологічна модель ущільнення ґрунту штампом

Fig. 2. Phenomenological model of densification of ґрунт stamp

Внаслідок різноманітності частинок ґрунту, що відрізняються за величиною, формою і орієнтацією, а також за різної міцності зв'язку між ними, руйнування протікає складним шляхом. Після прикладання на-

вантаження зв'язки між частинками ґрунту руйнуються не відразу по всій зоні його дії, а поступово, спочатку там, де його міцність мінімальна, а напруження максимальні. В місцях руйнування зв'язків з'являються мікротріщини і відокремлюються елементи тої чи іншої форми і величини, які за зростання навантаження продовжують подрібнюватися. Вся складність напружено-деформованого стану, процесу деформації і руйнування ґрунтів характеризується трьома якісними властивостями ґрунту: пружністю, пластичністю і в'язкістю. В реологічному моделюванні вони представлені моделями Гука, Сен-Венана і Ньютона, які умовно позначаються відповідно H , SV і N . При прикладанні навантаження на ґрунти відгук останніх буде містити в собі в тій чи іншій мірі всі три складові.

Для побудови найбільш вичерпної реологічної моделі руйнування робочих середовищ, окрім дослідження властивостей ґрунтів, необхідний детальний опис геометричних, кінематичних, силових і енергетичних параметрів взаємодії робочих органів і робочих середовищ. Загальною геометричною характеристикою процесу руйнування ґрунтів є форма прорізу. Він в певній мірі відображає особливості деформаційних процесів в ґрунті при його руйнуванні. Треба відмітити, що в різних ділянках прорізу відбуваються різні процеси деформування ґрунтів і останні виявляють різні властивості, тому реологічна модель процесу деформування і руйнування ґрунтів повинна мати просторовий характер.

На Рис. 3 представлена реологічна модель руйнування ґрунту різанням. Ця модель враховує просторовість напружено-деформованого стану і його принципові особливості в кожній ділянці зони навантаження ґрунтового масиву. Крім деформаційних процесів при різанні відбувається і інші фізико-механічні процеси, що супроводжують руйнування ґрунтів різанням. Окрім просторового (координати x , y , z) характеру руйнування відбувається у часі, тому всі процеси розвиваються і в залежності від параметру t .

В початковий момент ($t=0$) різальний елемент контактує з ґрунтом передньою

гранню з мінімальною площиною. Крім того, в контактi з ґрунтом знаходиться різальна кромка і мінімальні відрізки бокових передніх ребер. В наступний момент при русі різального елемента зі швидкістю v вздовж осі X (Рис. 3) починається пружне деформування ґрунту, яке імітується двома пружними тілами H_p , а також пружними тілами H_k і H_r . Тут тіла H_p імітують пружину деформації правим і лівим передніми ребрами, а H_k і H_r – різальною кромкою і передньою гранню. В граничному шарі між ребрами, кромкою і ґрунтом при досягненні в цьому шарі напружень величини межі пружності, починається процес тертя між ребрами, кромкою і ґрунтом, який моделюється тілами SV_p і SV_k . З подальшим просуванням різального елемента в ґрунті напружено-деформований стан його ускладнюється і захоплює все більший об'єм ґрунту, в ньому починають розвиватися деформації різних типів як в зоні бокових ребер і різальної кромки, так і в зоні деформування ґрунту передньою гранню, що моделюються відповідними феноменологічними тілами.

Таким чином, позначення просторової реологічної моделі процесу різання ґрунтів представляються як:

– для різальної кромки:

$$(H_k - (SV_1 \text{ I } H_1 \text{ I } N_1)) \text{ I } SV_k; \quad (1)$$

– для ребра:

$$(H_p - (SV_2 \text{ I } H_2 \text{ I } N_2)) \text{ I } SV_p; \quad (2)$$

– для передньої грані:

$$\begin{cases} H_r - (SV_3 \text{ I } H_3 \text{ I } N_3), \\ SV_r. \end{cases} \quad (3)$$

Друга складова позначення (3) моделює витрати енергії на подолання роботи тертя ґрунту по передній грані. Треба відмітити, що в назві складних феноменологічних моделей першою є назва виду деформації, що відбувається в першу чергу після прикла-

дання навантаження, тому навіть для одного і того ж комплексу складових тіл їх порядок у назві може змінюватися в залежності від виду робочих середовищ, їх властивостей і умов навантаження.

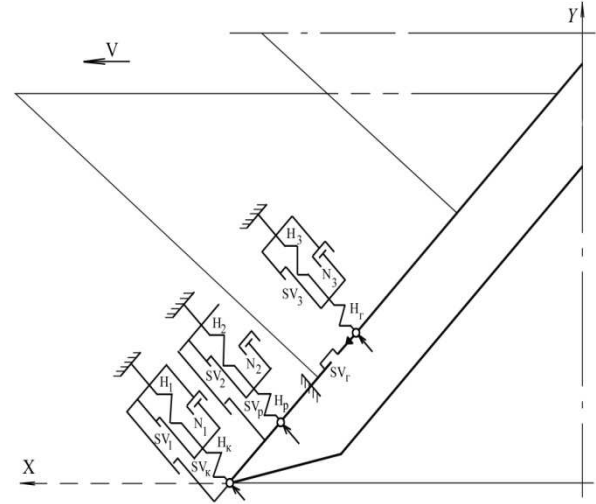


Рис. 3. Просторова реологічна модель процесу різання ґрунтів

Fig. 3. Spatial rheological model of the process of soil retention

При русі різального елемента вздовж осі X на певну величину x величина абсолютної деформації в напрямку, нормальному до передньої грані, визначиться як

$$x' = x \sin \delta, \quad (4)$$

де δ – кут різання.

Напруження, нормальні до передньої грані, що імітуються наведеною феноменологічною моделлю різання ґрунтів, визначаються наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} \sigma_\Sigma &= \tau_{svk} + 2\tau_{svp} = \sigma_{Hr} = \tau_{sv3} = \sigma_{H3} + \tau_{N3}; \\ \tau_{svk} &= \sigma_{Hk} = \tau_{sv1}; \\ \tau_{svp} &= \sigma_{Hp} = \tau_{sv2}; \\ \tau_{sv1} &= \sigma_{H1} + \tau_{N1}; \\ \tau_{sv2} &= \sigma_{H2} + \tau_{N2}; \\ \tau_{sv3} &= \sigma_{H3} + \tau_{N3}. \end{aligned}$$

Рух відокремлених елементів по передній грані моделюється реологічним тілом SV_r . Дотичні напруження, що виникають

при пересуванні відокремленого ґрунту по передній грані, визначаються з рівняння

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{svr} \cdot \quad (5)$$

Рівняння для визначення деформацій записуються у вигляді

$$\begin{aligned} x'_{\Sigma} &= x'_{svk} = x'_{svp} = x'_{nr} + x'_{sv3}; \\ x'_{svk} &= x'_{h1} + x'_{sv1}; \\ x'_{svp} &= x'_{h2} + x'_{sv2}; \\ x'_{sv1} &= x'_{h1} + x'_{N1}; \\ x'_{sv2} &= x'_{h2} + x'_{N2}; \\ x'_{sv3} &= x'_{h3} + x'_{N3}; \\ x''_{\Sigma} &= x''_{svr}. \end{aligned}$$

Величина переміщення x'' зруйнованого ґрунту по поверхні передньої грані визначається аналогічно за формулою (4):

$$x'' = x \cos \sigma. \quad (6)$$

Реологічні коефіцієнти тіл, що складають модель (модуль пружності, коефіцієнт в'язкості, межа пластичності, час релаксації) не залишаються незмінними і змінюються в процесі деформування, тобто $E; \eta; \tau_{nl}; T_p = f(S, h, V)$, де S – площа контакту різального елемента з робочим середовищем; h – глибина різання; V – швидкість взаємодії різального елемента з ґрунтом.

За моделювання ударного процесу руйнування ґрунтів реологічна модель представлена на Рис. 4.

Найменування просторової реологічної моделі ударного руйнування ґрунтів формується таким чином:

– для ударної кромки:

$$H_k - (H_1 \text{ I } SV_1 \text{ I } N_1); \quad (7)$$

– для бокової грані:

$$\begin{cases} H_r - (SV_2 \text{ I } H_2 \text{ I } N_2), \\ SV_r. \end{cases} \quad (8)$$

Залежність деформацій y' і y'' на бокових гранях від деформацій удовж осі Y визначається з формул

$$y' = y \sin \frac{\alpha}{2}; \quad (9)$$

$$y'' = y \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (10)$$

Напруження, що імітуються просторовою феноменологічною моделлю ударного руйнування ґрунтів, визначається за системою рівнянь

$$\begin{aligned} \sigma_{\Sigma} &= \sigma_{hk} + 2\sigma_{nr} + 2\tau_{svr} = \tau_{sv1} + \tau_{sv2}; \\ \tau_{sv1} &= \sigma_{h1} + \tau_{N1}; \\ \tau_{sv2} &= \sigma_{h2} + \tau_{N2}. \end{aligned}$$

Рівняння деформацій:

– для ударної кромки:

$$y_{\Sigma} = y_{hk} + y_{sv1};$$

$$y_{sv1} = y_{h1} = y_{N1};$$

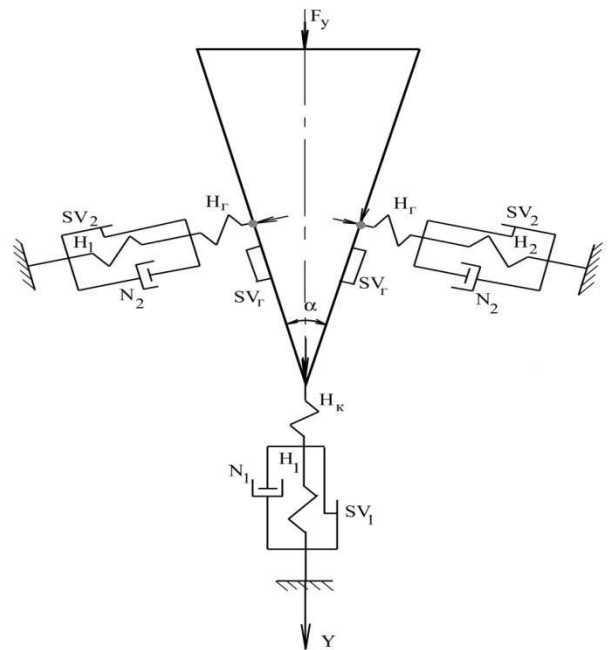


Рис. 4. Просторова реологічна модель ударного руйнування ґрунтів

Fig. 4. Spatial rheological model of shock damage of soils

– для бокової грані:

$$\begin{aligned} y'_{\Sigma} &= y'_{H2} + y'_{sv2}; \\ y'_{sv2} &= y'_{H2} = y'_{N1}; \\ y''_{svr} &= y_{HK} + y_{sv1}, \end{aligned}$$

де y' і y'' – деформації ґрунту (нормальні і дотичні) до бокової грані ударника відповідно.

Реологічні коефіцієнти тіл, що складають модель ударного руйнування ґрунтів, є динамічними, що залежать від швидкості прикладання ударного навантаження.

Остання із запропонованих реологічних моделей, а саме просторова реологічна модель ударного руйнування (див. Рис. 4), є описом способу динамічного руйнування ґрунтів [2]. Зниження енергоємності процесу руйнування ґрунтів відбувається за рахунок надання робочому органу поряд з поздовжніми ударами додатково поперечних коливань. Тобто, основним робочим рухом робочого органа є удар по прямолінійній траєкторії з деяким ударним зусиллям, після якого ударник зруйнує частину ґрунту, заглибившись на деяку глибину. В момент закінчення удару поворотний механізм поверне робочий орган по коловій траєкторії спочатку в один бік відносно прямолінійної траєкторії, а потім в інший. При цьому бокові грані клиновидного робочого органа зминатимуть ґрунт в бокових стінках зони руйнування по обидва боки. Внаслідок того, що при русі робочого органа по коловій траєкторії відсутній ударний рух, зминання ґрунту відбувається за рахунок руху бокових стінок робочого органа практично перпендикулярно до бокових стінок зони руйнування. При цьому відбувається прямокутне зминання ґрунту при відсутності тертя. Коли робочий орган зробить повне коливання, наноситься наступний удар по прямолінійній траєкторії і завдяки тому, що робочий орган не контактує своїми боковими гранями з ґрунтом, відсутні витрати енергії на косий ударний контакт з ґрунтом і тертя бокових граней по ґрунту. Таким чином, вся енергія удару реалізується на різальній кромці робочого органа без втрат. Центр колової траєкторії знаходиться на прямолінійній траєкторії, по якій відбувається удар. Положення його

залежить від фізико-механічних характеристик ґрунту і режимів руйнування. В окремому випадку центр колової траєкторії співпадає з точкою контакту різальної кромки робочого органа з ґрунтом. При цьому відсутнє тертя різальної кромки об ґрунт.

ВИСНОВКИ

Робочі середовища ґрунторуйнуючої техніки становлять ґрунти, які мають трифазну будову. В різних ділянках прорізу відбуваються різні процеси деформування робочих середовищ і останні виявляють різні властивості, тому реологічна модель процесу деформування і руйнування ґрунтів повинна мати просторовий характер.

Технічні системи, що реалізують інтенсифікаційний процес розробки ґрунтів, базуються на результатах теоретичних і експериментальних досліджень і дають можливість підвищити ефективність процесу за енергетичними показниками і показниками продуктивності.

За ударного руйнування сформований структурний рух ударників, які мають коливання в різних площинах, що дає можливість керувати потоками енергії в робочій зоні. Розроблені просторові механореологічні моделі високошвидкісного і ударного руйнування, які враховують особливості руйнування в окремих ділянках робочої зони.

За феноменологічною моделлю визначені передумови і припущення щодо законів зміни пружно-пластичних і в'язких властивостей і на цій основі здійснені аналітичні дослідження певного класу технічних систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ветров Ю.А., Баладинский В.Л., 1980.** Машины для специальных земляных работ: учеб. пособие. Київ, Вища шк., 192.
2. **Фомін А.В., Костенюк О.О., Тетерятник О.А., Боковня Г.І., 2015.** Визначення геометричних параметрів ударного руйнування ґрунтів при впорядкованому русі робочого органа. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, Вип.84, 77-85.

3. **Фомін А.В., Костенюк О.О., Тетерятник О.А., Боковня Г.І., 2014.** Розробка конструкції різальних елементів з урахуванням самоорганізації і еволюції геометричних форм. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, Вип.85, 91-97.
4. **Евтюков С.А., Овчаров А.А., Замараев И.В., 2011.** Построение механореологических моделей процессов взаимодействия рабочих органов строительно-дорожных машин со средой. С.Пб, ГАСУ. СПб., 59.
5. **Патент України на корисну модель 87729, 2014.** Розпушник з активним робочим органом. Опубл. 10.02.2014, БИ 3, 6.
6. **Патент України на корисну модель 89059, 2014.** Розпушник з керованим заглибленням робочого органа. Опубл. 10.04.2014, БИ 7, 7.
7. **Патент України на корисну модель 99656, 2015.** Динамічний зуб землерийної машини. Опубл. 10.06.2015, БИ 11, 6 с.

REFERENCES

1. **Vetrov Y.A., Baladinskiy V.L., 1980.** Machines for special excavation works. Tutorial. Kyiv, Higher school, 192. (in Russian).
2. **Fomin A.V., Kostenyuk A.A., Teteryatnik A.A., Bokovnya G.I., 2015.** Determination of geometrical parameters the impact damage of soils under the ordered movement of the working body. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny, Nr.84, 77-85. (in Ukrainian).
3. **Fomin A.V., Kostenyuk A.A., Teteryatnik A.A., Bokovnya G.I., 2015.** Development of the design cutting elements, taking into account the self-organization and evolution of geometric shapes. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny, Nr.85, 91-97 (in Ukrainian).
4. **Yevtyukov S.A., Ovcharov A.A., Zamaraev I.V., 2011.** Construction of mechanoreological models from processes of interaction between the working bodies of road construction machinery with the environment. Saint Petersburg. GASU, 59. (in Russian).
5. **Patent of Ukraine on the utility model 87729, 2014.** Ripper with active working body. Published on 10.02.2014, Bulletin of Inventions 3.
6. **Patent of Ukraine on the utility model 89059, 2014.** Ripper with a controlled penetration of the working body. Published on 10.04.2014, Bulletin of Inventions 7.
7. **Patent of Ukraine on the utility model 87729, 2015.** Dynamic tooth of earthmoving machine. Published on 10.06.2015, Bulletin of Inventions 11.

Rheological model destruction soil of working organ whit structural moving cutter

*Aleksandr Kostenyuk, Anatoly Fomin,
Aleksandr Teteryatnik, Galina Bokovnya*

Abstract. Recently, much attention has been paid to intensification processes in many sectors of the economy and mechanical engineering.

In addition to the intensification of production processes, attention and intensification of processes of interaction between working bodies and destroyed environments are not overlooked.

Intensification of working processes in the design of working environments represented by soils is due to shock, vibration, vibration and high-speed loading of the working environment. In this case, the soil undergoes complicated deformation processes that occur with different energy transformations, which is transmitted to the soil from the working bodies of technical systems of soil-destroying machines.

When deforming and destroying the working media, the latter exhibit elastic, plastic and viscous properties. In addition, in addition to internal movement in working environments, external friction processes occur between the cutting elements and the soil. Working environments consist of soils, which in general have a three-phase structure, the feature of which is that, in addition to solid particles of soil in its volume are water, saline solutions and gas.

Two methods of mathematical modeling are used to describe the processes of formation of energy flows and their transformation in the destruction of soils. For the first method, when describing processes, methods are used based on the application of the theory of elasticity and plasticity of continuous media. The second method is based on the application of phenomenological mechanoreological models.

Due to the fact that the processes of dynamic destruction of the working medium occur in space and time, the mechano-reliance model of high-speed destruction of working media should describe changes in the nature of deformations and stresses at each contact point of the cutting element with the soil, as well as the quantitative and qualitative dependence of the stress-strain state on the load speed and time the process of deforming the working environment.

Key words: intensification of working processes, rheological model, high-speed destruction, stress-strain state.