



Модельовання технологічних процесів

УДК 624. 879

Л.Є. Пелевін, к. т. н., проф. КНУБА,
М.О. Пристайло, КНУБА

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЮВАННЯ РІЗАННЯ ҐРУНТУ НАКОНЕЧНИКОМ З КОНСОЛІЮ

АНОТАЦІЯ. В статті доведено, що при проведенні лабораторних досліджень по різанню ґрунту наконечником з консоллю доцільно використовувати модель ґрунту, зокрема парафін, та визначено параметри моделі наконечника

Ключові слова. Модель, ґрунт, наконечник, консоль.

АНОТАЦІЯ. В статье доказано, что при проведении лабораторных исследований по резке почвы наконечником из консолю целесообразно использовать модель грунта, частности парафин, и определены параметры модели наконечника.

Ключевые слова. Модель, почва, наконечник, консоль.

SUMMARY. This article has shown that during laboratory tests on soil cutting tip of cantilever installed cutting edge appropriate to use a model of soil including paraffin and defined geometric parameters of the model tip.

Key words. Model, soil, tip, cantilever.

Вступ. Експериментальні дослідження процесу різання ґрунту передбачають вирішення наступних основних задач:

- створення моделі ґрунту з заданими фізико-механічними характеристиками;
- розробку, виготовлення та апробація лабораторної установки та моделі робочого органу;
- оцінка достовірності силових параметрів визначених теоретичними дослідженнями [1].

Мета і постановка задачі. Обґрунтувати модель ґрунту (робочого середовища) та визначити параметри моделі наконечника з консоллю для визначення її впливу на процес різання ґрунту.

Виклад основного матеріалу. Широка гамма ґрунтів і відмінність в протіканні процесу їх різання, вимагають визначення кожної з названих залежностей для декількох ґрунтів. Експериментальні дослідження проводяться на наступних ґрунтах: спонділова глина, каоліни, лісовидний суглинок, ущільнений річний пісок, щебінь різної фракції [2].

Крім названих натуральних ґрунтів для досліджень використовуються штучні ґрунти (моделі), що характеризуються достатньо постійними властивостями.

Постійність властивостей ґрунтів має велике значення, тому що вивчення окремих закономірностей і особливо фізичних явищ, супроводжуваних процесом, мало необхідність багаторазового повторення дослідів при умові стабільності властивостей досліджуваних зразків та монолітів. Для моделювання ґрунтів використовують парафін, цементно-піщані суміші і суміші парафіну з річним піском. Фізико-механічна характеристика досліджуваних натуральних і штучних ґрунтів приведена в таблиці 1.

Одним з кращих матеріалів для моделювання ґрунтів з пружно-пластичними властивостями являється парафін. Крім постійності фізико-механічних властивостей з протягом часу та при повторному приготуванні, парафін дає можливість візуального визначення характеру деформації окремих ділянок стружки по зміні структури та кольору деформованих ділянок, а також спостерігати зародження і подальше розповсюдження тріщин в процесі руйнування. Для дослідження напруженого стану ґрунтового масиву парафін зручний тим що при виникненні пластичних деформацій в ньому змінюється оптичні властивості. Характер руйнування парафіну в процесі різання подібний характеру руйнування глинистих ґрунтів. В йому, як і у глинистих ґрунтах, утворюється проріз з

вертикальними боковими поверхнями біля дна, подібні елементи стружки, спостерігаються характерне коливання сили різання.

Таблиця 1.

Фізико механічна характеристика досліджених ґрунтів та матеріалів.

Ґрунт або матеріал	Густина ρ , г/см ³	Вологість по масі, %	Число ударів ударника ДОРНИИ	Опір стискання МПа	Кут внутрішнього тертя	зчеплення
Спондилова глина (Київська обл.)	1,93	28,3	14	1,09	13°20'	0,41
Коаліни (черкаська обл.)	1,85	32,2	7-10	0,29	8°06'	0,29
Лісовидний суглинок (житомирська обл.)	1,55	18,3	11	0,16	41°36'	0,03
Ущільнений річний пісок	1,80	10,8	40	-	-	-
парафін	0,85	-	32	1,45	22°30'	0,37
Суміш парафіну з річним піском	1,85	-	34	2,96	21°18'	0,97
Цементно піщана суміш	1,93	-	8	-	-	-

На якісну аналогію стружки утворень парафіну і глинистих ґрунтів звертав увагу А.Н. Зеленін. Використовували в своїх дослідженнях В.А. Захаров, Б.В. Нечезеленко, В.І. Рипуло, Ю.П. Пристайло, В.М. Смірнов та деякі інші дослідники [2].

Тому, при фізичному моделюванні варто зважати на вище перелічені властивості парафіну та досвід науковців, що використовували його в своїх.

Таке моделювання дає змогу з мінімальними затратами провести дослідження нових конструктивних рішень РО і оптимізувати його параметри. Методологія моделювання робочих процесів розпушування ґрунтів базується на теорії подібності [3].

Умови фізичного моделювання робочого процесу розпушування ґрунтів передбачають, що: визначаючі критерії подібності процесу розпушування ґрунту для моделі і оригіналу повинні бути одаковимн; однойменні фізичні параметри системи диференційних рівнянь, що описують робочий процес, складених для моделі і оригіналу, повинні бути відповідно пропорційними; процес взаємодії РО з середовищем в моделі і оригіналі повинен належати до одного класу явищ і описуватися однаковою системою диференційних рівнянь; модель і оригінал РО і системи в цілому повинні бути геометрично подібні; початкові умови, що характеризують робочий процес в моделі, повинні бути подібні відповідним умовам оригіналу; граничні умови моделі повинні бути подібні граничним умовам оригіналу[4].

Взаємодія наконечника з консоллю та робочого середовища описується рівнянням

[5]

$$\begin{aligned}
 P_{N\delta} = & m_a \cdot H \cdot b_K + 2m_{a^{3:i}} \cdot H^2 + 2m_{a^{3:i..n\delta}} \cdot H + \frac{2m_a^2 \cdot L_E^5 \cdot b_E^2}{\Omega \cdot c_K^3 \cdot b_K \cdot V \cdot T_c \cdot \cos \beta} + \\
 & + \frac{8m_{a^{3:i}}^2 \cdot L_E^7}{\Omega \cdot c_K^3 \cdot b_K \cdot V \cdot T_c \cdot \cos \beta} + \frac{8m_{a^{3:i..n\delta}}^2 \cdot L_E^5}{\Omega \cdot c_K^3 \cdot b_K \cdot V \cdot T_c \cdot \cos \beta} + \frac{8m_a \cdot L_E^6 \cdot b_E \cdot m_{a^{3:i}}}{\Omega \cdot c_K^3 \cdot b_K \cdot V \cdot T_c \cdot \cos \beta} + \\
 & + \frac{8m_a \cdot L_E^5 \cdot b_E \cdot m_{a^{3:i..n\delta}}}{\Omega \cdot c_K^3 \cdot b_K \cdot V \cdot T_c \cdot \cos \beta} + \frac{16m_{a^{3:i}} \cdot L_E^6 \cdot m_{a^{3:i..n\delta}}}{\Omega \cdot c_K^3 \cdot b_K \cdot V \cdot T_c \cdot \cos \beta} - \frac{3u \cdot L_E^2 \cdot b_E \cdot c_E \cdot \rho_{c\delta}}{8V \cdot T_c \cdot \cos \beta}
 \end{aligned} \quad (1)$$

де: $P_{N\delta}$ - сила опору ґрунта різанню наконечником з консоллю;

m_a - коефіцієнт, що характеризує питому силу для руйнування ґрунту в вільному зрізі;

$m_{a^{3:i}}$ - коефіцієнт, що характеризує питому силу для руйнування ґрунту в бічних зонах;

$m_{a^{3:i..n\delta}}$ - коефіцієнт, що характеризує питому силу для руйнування ґрунту в бічних зрізах;

H – глибина різання; L_E - довжина консолі; b_E - ширина консолі; c_E - товщина консолі; V - швидкість впровадження РО; T_c - час сколу елемента ґрунту; β_i - кут різання; u - швидкість розповсюдження хвилі деформації в ґрунті; $\rho_{c\delta}$ - густина сталі (матеріалу з якого

виготовлений наконечник); $\Omega = 10^{11} \frac{H}{\lambda^2}$ - коефіцієнт пропорційності.

Для виконання умов подібності процесів, що відбуваються при взаємодії з середовищем фізичної моделі оригіналу РО необхідне дотримання рівності геометричних і динамічних критеріїв подібності [6]. Запишемо параметри натурального процесу через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності

$$P_{N\delta i} = v_{P_{N\delta}} \cdot P_{N\delta \lambda}, \quad m_{a i} = v_m \cdot m_{a \lambda}, \quad m_{a^{3:i..H}} = v_{m_{a^{3:i}}} \cdot m_{a^{3:i..H \lambda}}, \quad m_{a^{3:i..n\delta i}} = v_{m_{a^{3:i..n\delta}}} \cdot m_{a^{3:i..n\delta \lambda}},$$

$$L_{i \lambda} = v_{L_i} \cdot L_{i \lambda}, \quad V_H = v_V \cdot V_M, \quad T_{c i} = v_{T_c} \cdot T_{c \lambda}, \quad \beta_{i \lambda} = v_{\beta_i} \cdot \beta_{i \lambda}, \quad u_i = v_u \cdot u_{i \lambda}, \quad \rho_{c\delta i} = v_{\rho_{c\delta}} \cdot \rho_{c\delta \lambda} \quad (2)$$

де $P_{N\delta i}$, $m_{a i}$, $m_{a^{3:i..H}}$, $m_{a^{3:i..n\delta i}}$, $L_{i \lambda}$, V_H , $T_{c i}$, $\beta_{i \lambda}$, u_i , $\rho_{c\delta i}$ параметри натуральної моделі,

$P_{N\delta \lambda}$, $m_{a \lambda}$, $m_{a^{3:i..H \lambda}}$, $m_{a^{3:i..n\delta \lambda}}$, $L_{i \lambda}$, V_M , $T_{c \lambda}$, $\beta_{i \lambda}$, $u_{i \lambda}$, $\rho_{c\delta \lambda}$ параметри фізичної моделі,

$v_{P_{N\delta}}$, v_m , $v_{m_{a^{3:i..H}}}$, $v_{m_{a^{3:i..n\delta}}}$, v_{L_i} , v_V , v_{T_c} , v_{β_i} , v_u , $v_{\rho_{c\delta}}$ відповідні коефіцієнти подібності. Тоді

можна записати рівняння, подібні рівнянню (1), для натурального процесу та його моделі, які мають вигляд

$$\begin{aligned}
 P_{N\delta i} = & m_{a i} \cdot H_i \cdot b_{K i} + 2m_{a^{3:i..H i}} \cdot H_i^2 + 2m_{a^{3:i..n\delta i}} \cdot H_i + \frac{2m_{a i}^2 \cdot L_{E i}^5 \cdot b_{E i}^2}{\Omega \cdot c_{K i}^3 \cdot V_H \cdot T_{c i} \cdot \cos \beta_i} + \\
 & + \frac{8m_{a^{3:i..H i}}^2 \cdot L_{E i}^7}{\Omega \cdot c_{K i}^3 \cdot b_{K i} \cdot V_H \cdot T_{c i} \cdot \cos \beta_i} + \frac{8m_{a^{3:i..n\delta i}}^2 \cdot L_{E i}^5}{\Omega \cdot c_{K i}^3 \cdot b_{K i} \cdot V_H \cdot T_{c i} \cdot \cos \beta_i} + \frac{8m_{a i} \cdot L_{E i}^6 \cdot b_{E i} \cdot m_{a^{3:i..H i}}}{\Omega \cdot c_{K i}^3 \cdot V_H \cdot T_{c i} \cdot \cos \beta_i} + \\
 & + \frac{8m_{a i} \cdot L_{E i}^5 \cdot b_{E i} \cdot m_{a^{3:i..n\delta i}}}{\Omega \cdot c_{K i}^3 \cdot V_H \cdot T_{c i} \cdot \cos \beta_i} + \frac{16m_{a^{3:i..H i}} \cdot L_{E i}^6 \cdot m_{a^{3:i..n\delta i}}}{\Omega \cdot c_{K i}^3 \cdot b_{K i} \cdot V_H \cdot T_{c i} \cdot \cos \beta_i} - \frac{3u_i \cdot L_{E i}^2 \cdot b_{E i} \cdot c_{E i} \cdot \rho_{c\delta i}}{8V_H \cdot T_{c i} \cdot \cos \beta_i}
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 P_{\bar{N}\bar{o}\bar{l}} = & m_{\bar{a}\bar{l}} H_{\bar{l}} \cdot b_{K\bar{l}} + 2m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}} \cdot H_{\bar{l}}^2 + 2m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}} \cdot H_{\bar{l}} + \frac{2m_{\bar{a}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5 \cdot b_{\bar{E}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}} + \\
 & + \frac{8m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^7}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot b_{K\bar{l}} \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}} + \frac{8m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot b_{K\bar{l}} \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}} + \frac{8m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^6 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}} + \quad (4) \\
 & + \frac{8m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}} + \frac{16m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^6 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot b_{K\bar{l}} \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}} - \frac{3u_{\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^2 \cdot b_{\bar{E}\bar{l}} \cdot c_{\bar{E}\bar{l}} \cdot \rho_{c\bar{o}\bar{l}}}{8V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}
 \end{aligned}$$

Виходячи з подібності моделі і натурального процесу, поділимо відповідні доданки рівнянь (3) і (4) між собою і запишемо співвідношення

$$\begin{aligned}
 \frac{P_{\bar{N}\bar{o}\bar{l}}}{P_{\bar{N}\bar{o}\bar{l}}} = & \frac{m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot H_{\bar{l}} \cdot b_{K\bar{l}}}{m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot H_{\bar{l}} \cdot b_{K\bar{l}}} = \frac{2m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}} H_{\bar{l}}^2}{2m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}} H_{\bar{l}}^2} = \frac{2m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}} H_{\bar{l}}}{2m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}} H_{\bar{l}}} = \frac{\frac{2m_{\bar{a}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5 \cdot b_{\bar{E}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}}{\frac{2m_{\bar{a}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5 \cdot b_{\bar{E}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}} = \\
 = & \frac{\frac{8m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^7}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot b_{K\bar{l}} \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}}{\frac{2m_{\bar{a}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5 \cdot b_{\bar{E}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}} = \frac{\frac{8m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot b_{K\bar{l}} \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}}{\frac{8m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot b_{K\bar{l}} \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}} = \frac{\frac{8m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^6 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}}{\frac{8m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^6 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}} = \\
 = & \frac{\frac{8m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}}{\frac{8m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}} = \frac{\frac{16m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^6 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot b_{K\bar{l}} \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}}{\frac{16m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^6 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot b_{K\bar{l}} \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}} = \frac{\frac{3u_{\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^2 \cdot b_{\bar{E}\bar{l}} \cdot c_{\bar{E}\bar{l}} \cdot \rho_{c\bar{o}\bar{l}}}{8V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}}{\frac{3u_{\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^2 \cdot b_{\bar{E}\bar{l}} \cdot c_{\bar{E}\bar{l}} \cdot \rho_{c\bar{o}\bar{l}}}{8V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}} \quad (5)
 \end{aligned}$$

Використавши для цих співвідношень залежності (2), отримаємо

$$\begin{aligned}
 \frac{v_{P_{\bar{N}\bar{o}\bar{l}}} \cdot P_{\bar{N}\bar{o}\bar{l}}}{P_{\bar{N}\bar{o}\bar{l}}} = & \frac{v_m \cdot m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot v_L^2 \cdot H_{\bar{l}} \cdot b_{K\bar{l}}}{m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot H_{\bar{l}} \cdot b_{K\bar{l}}} = \frac{2v_{m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}}} \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}} \cdot v_L^2 \cdot H_{\bar{l}}^2}{2m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}} \cdot H_{\bar{l}}^2} = \frac{2v_{m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}} \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}} \cdot v_L \cdot H_{\bar{l}}}{2m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}} \cdot H_{\bar{l}}} = \\
 = & \frac{\frac{2v_m^2 \cdot m_{\bar{a}\bar{l}}^2 \cdot v_L^6 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5 \cdot b_{\bar{E}\bar{l}}}{\Omega \cdot v_L^3 \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot v_V \cdot V_{\bar{l}} \cdot v_{T_c} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot v_{\beta} \cdot \beta_{\bar{l}}}}{\frac{2m_{\bar{a}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5 \cdot b_{\bar{E}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}} = \frac{\frac{8v_{m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}}}^2 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}}^2 \cdot v_L^7 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^7}{\Omega \cdot v_L^4 \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot b_{K\bar{l}} \cdot v_V \cdot V_{\bar{l}} \cdot v_{T_c} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot v_{\beta} \cdot \beta_{\bar{l}}}}{\frac{2m_{\bar{a}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5 \cdot b_{\bar{E}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}} = \\
 = & \frac{\frac{8v_{m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}}^2 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}^2 \cdot v_L^5 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5}{\Omega \cdot v_L^4 \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot b_{K\bar{l}} \cdot v_V \cdot V_{\bar{l}} \cdot v_{T_c} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot v_{\beta} \cdot \beta_{\bar{l}}}}{\frac{8m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}\bar{n}\bar{o}\bar{l}}^2 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^5}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot b_{K\bar{l}} \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}} = \frac{\frac{8v_m \cdot m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot v_L^6 \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^6 \cdot v_{m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}}} \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}}}{\Omega \cdot v_L^3 \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot v_V \cdot V_{\bar{l}} \cdot v_{T_c} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot v_{\beta} \cdot \beta_{\bar{l}}}}{\frac{8m_{\bar{a}\bar{l}} \cdot L_{\bar{E}\bar{l}}^6 \cdot m_{\bar{a}^3\bar{z}\bar{i}\bar{l}}}{\Omega \cdot c_{K\bar{l}}^3 \cdot V_{\bar{l}} \cdot T_{c\bar{l}} \cdot \cos \beta_{\bar{l}}}} =
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& \frac{8v_m \cdot m_{\dot{a}\dot{l}} \cdot v_L^5 \cdot L_{\dot{E}\dot{l}}^5 \cdot v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}} \cdot m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}}{\Omega \cdot v_L^3 \cdot c_{K\dot{l}}^3 \cdot v_V \cdot V_{\dot{l}} \cdot v_{T_c} \cdot T_{c\dot{l}} \cdot v_{\beta} \cdot \beta_{\dot{l}}} = \frac{16v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}} \cdot m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}} \cdot v_L^6 \cdot L_{\dot{E}\dot{l}}^6 \cdot v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}} \cdot m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}}{\Omega \cdot v_L^4 \cdot c_{K\dot{l}}^3 \cdot b_{K\dot{l}} \cdot v_V \cdot V_{\dot{l}} \cdot v_{T_c} \cdot T_{c\dot{l}} \cdot v_{\beta} \cdot \beta_{\dot{l}}} = \\
& = \frac{8m_{\dot{a}\dot{l}} \cdot L_{\dot{E}\dot{l}}^5 \cdot m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}}{\Omega \cdot c_{K\dot{l}}^3 \cdot V_{\dot{l}} \cdot T_{c\dot{l}} \cdot \cos \beta_{\dot{l}}} = \frac{16m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}} \cdot L_{\dot{E}\dot{l}}^6 \cdot m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}}{\Omega \cdot c_{K\dot{l}}^3 \cdot b_{K\dot{l}} \cdot V_{\dot{l}} \cdot T_{c\dot{l}} \cdot \cos \beta_{\dot{l}}} \quad (6) \\
& = \frac{3v_u \cdot u_{\dot{l}} \cdot v_L^4 \cdot L_{\dot{E}\dot{l}}^2 \cdot b_{\dot{E}\dot{l}} \cdot c_{\dot{E}\dot{l}} \cdot v_{\rho_{\dot{c}\dot{o}}}}{8v_{V_H} \cdot V_{\dot{l}} \cdot v_{T_c} \cdot T_{c\dot{l}} \cdot v_{\beta} \cdot \beta_{\dot{l}}} \\
& = \frac{3u_{\dot{l}} \cdot L_{\dot{E}\dot{l}}^2 \cdot b_{\dot{E}\dot{l}} \cdot c_{\dot{E}\dot{l}} \cdot \rho_{\dot{c}\dot{o}}}{8V_{\dot{l}} \cdot T_{c\dot{l}} \cdot \cos \beta_{\dot{l}}}
\end{aligned}$$

Згідно з теореми подібності скорочуємо вираз (6) в результаті чого отримуємо співвідношення між коефіцієнтами подібності

$$\begin{aligned}
v_{P_{\dot{N}\dot{O}}} &= v_m \cdot v_L^2 = v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}} \cdot v_L^2 = v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}} \cdot v_L = \frac{v_m^2 \cdot v_L^6}{v_L^3 \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = \frac{v_m \cdot v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}} \cdot v_L^7}{v_L^4 \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = \frac{v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}}^2 \cdot v_L^5}{v_L^4 \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = \\
& = \frac{v_m \cdot v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}} \cdot v_L^6}{v_L^3 \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = \frac{v_m \cdot v_L^5 \cdot v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}}}{v_L^3 \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = \frac{v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}} \cdot v_L^6 \cdot v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}}}{v_L^4 \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = \frac{v_u \cdot v_L^4 \cdot v_{\rho_{\dot{c}\dot{o}}}}{v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} \quad (7)
\end{aligned}$$

Розділивши всі частини співвідношення (7) на $v_{P_{\dot{N}\dot{O}}}$, отримуємо систему з рівнянь

$$\begin{aligned}
\frac{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}}}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}}} &= 1; \frac{v_m \cdot v_L^2}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}}} = 1; \frac{v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}} \cdot v_L^2}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}}} = 1; \frac{v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}} \cdot v_L}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}}} = 1; \frac{v_m^2 \cdot v_L^3}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}} \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = 1; \\
\frac{v_m \cdot v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}} \cdot v_L^3}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}} \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} &= 1; \frac{v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}}^2 \cdot v_L}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}} \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = 1; \frac{v_m \cdot v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}} \cdot v_L^3}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}} \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = 1; \\
\frac{v_m \cdot v_L^2 \cdot v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}}}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}} \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} &= 1; \frac{v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}} \cdot v_L^2 \cdot v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}}}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}} \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = 1; \frac{v_u \cdot v_L^4 \cdot v_{\rho_{\dot{c}\dot{o}}}}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}} \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = 1. \quad (8)
\end{aligned}$$

Оскільки деякі з рівнянь ідентичні, залишимо з них чотири рівняння:

$$\frac{v_m \cdot v_L^2}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}}} = 1; \quad (9)$$

$$\frac{v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}} \cdot v_L}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}}} = 1; \quad (10)$$

$$\frac{v_m^2 \cdot v_L^3}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}} \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = 1; \quad (11)$$

$$\frac{v_u \cdot v_L^4 \cdot v_{\rho_{\dot{c}\dot{o}}}}{v_{P_{\dot{N}\dot{O}}} \cdot v_V \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta}} = 1, \quad (12)$$

які зв'язують між собою дев'ять невідомих величин. З них п'ять величин визначимо, знаючи фізичні властивості ґрунту та моделі:

$$\begin{aligned}
v_m &= \frac{m_{\dot{a}\dot{l}}}{m_{\dot{a}\dot{l}}} = \frac{20.5 \cdot 10^5}{7.6 \cdot 10^5} = 2.697, \quad v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}} = \frac{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}}{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l}}} = \frac{7.3 \cdot 10^4}{2.2 \cdot 10^4} = 3.318, \\
v_{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}} &= \frac{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}}{m_{\dot{a}^3 \cdot \dot{l} \cdot \dot{n}\dot{d}}} = \frac{20.4 \cdot 10^3}{4.365 \cdot 10^3} = 4.673, \quad v_{T_c} = \frac{T_{c\dot{l}}}{T_{c\dot{l}}} = \frac{0.174}{0.162} = 1.074, \quad v_{\beta_i} = 1, \\
v_u &= \frac{u_{\dot{l}}}{u_{\dot{l}}} = \frac{799.503}{762.012} = 1.0492,
\end{aligned}$$

, а чотири визначимо:

$$\text{з рівнянь (9) та (10) } v_{L_i} = \frac{v_{m_{d^2-i.\tilde{n}\tilde{d}}}}{v_m} = \frac{4.673}{2.967} = 1.575,$$

$$\text{з рівняння (9) } v_{P_{\tilde{N}\tilde{O}}} = v_m \cdot v_{L_i}^2 = 2.697 \cdot 1.575^2 = 6.6908,$$

$$\text{з рівняння (11) } v_{V_H} = \frac{v_{m_{d^2-i.\tilde{n}\tilde{d}}} \cdot v_{L_i}}{v_{P_{\tilde{N}\tilde{O}}} \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta_i}} = \frac{4.673 \cdot 1.575}{6.6908 \cdot 1.074 \cdot 1} = 1.024,$$

$$\text{з рівняння (12) } v_{\rho_{c\tilde{b}}} = \frac{v_{P_{\tilde{N}\tilde{O}}} \cdot v_{V_H} \cdot v_{T_c} \cdot v_{\beta_i}}{v_{L_i}^4 \cdot v_u} = \frac{6.6908 \cdot 1.024 \cdot 1.074 \cdot 1}{1.575^4 \cdot 1.0492} = 1.139.$$

Підставивши ці значення у співвідношення (2), визначено геометричні параметри наконечника: ширину наконечника $L_{bM} = \frac{L_{bH}}{v_{L_i}} = \frac{0.08}{1.575} = 0.0507\text{ м}$, товщину консолі

$$L_{cM} = \frac{L_{cH}}{v_{L_i}} = \frac{0.02}{1.575} = 0.012\text{ м}; \text{ матеріал моделі наконечника } \rho_{cmM} = \frac{\rho_{cmH}}{v_{\rho_{cm}}} = \frac{9800}{1.139} = 8604 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

(сталь); глибину різання $L_{HM} = \frac{L_{HH}}{v_{L_i}} = \frac{0.24}{1.575} = 0.15\text{ м}$; кут різання $\beta_{iM} = \beta_{iH}$; швидкість

$$\text{різання } V_i = \frac{V_i}{v_V} = \frac{0.25}{1.024} = 0,244 \frac{\dot{i}}{\tilde{n}}.$$

Висновок. Отже, для проведення лабораторних досліджень наконечника з консолю зважаючи на властивості, зокрема, оптичні, обрана модель ґрунту - парафін. Використовуючи теорію подібності визначено ширину наконечника, що дорівнює 0,05 м., товщину консолі – 0,012 м., глибину різання – до 0,15 м., кут різання -45° , матеріал моделі наконечника – сталь швидкість впровадження моделі в ґрунт – 0,24 м/с, та знайдено коефіцієнт подібності для порівняння силових параметрів робочого процесу, визначених теоретично та отриманих з досліджень. Це дало можливість для розробки та проектування натурального робочого органа розпушника наконечник якого обладнаний консольною ріжучою кромкою.

Література

1. Встров Ю.А. “Резание ґрунтов землеройными машинами“, “Машиностроение” М., 1971. – 360 с.
2. Смірнов В.М. Основи теорії різання ґрунтів просторово-орієнтованими ножами робочих органів землерійних машин: Монографія. – К.: - “МП Леся”, 2009. – 260 с.
3. Теория подобия. Моделирование/Алабужев П.М., Геронимус, Минкевич Л.М. и др. – М.: Высшая школа 1968. – 345 с.
4. Баловнев В.И. “Физическое моделирование резания ґрунтов”, – М.: Машиностроение, 1969.-160 с.
5. Пелевін Л.Є., Пристайло М. О. Руйнування ґрунтів та гірських порід деформатором зконсольною ріжучою кромкою // Гірничі бадівельні, дорожні та меліоративні машини, 2005.- № 70.
6. Ловеїкін В.С., Назаренко І.І., Онищенко О.Г. Теорія технічних систем: Навч. посібник. – Київ – Полтава: ІЗМН – ПДТУ, 1998. – 175 с.