

**УДК 625.768.5**

**Тхорук Є.І., к.т.н., доцент, Голотюк М.В., асистент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)**

### **ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ РОЗМІЩЕННЯ ЗУБЦІВ НА РОБОЧОМУ ОРґАНІ ДЛЯ СКОЛЮВАННЯ ЛЬОДУ**

**Викладено теоретичні дослідження зміни напруженого стану льоду та обґрунтовано оптимальну систему розстановки зубців. Визначено та теоретично обґрунтовано зміну енергоємності процесу руйнування льодового шару та виконана оцінка якості очищення дорожнього покриття залежно від розстановки зубців на робочому органі.**

**Ключові слова:** льодове покриття, тріщина, руйнування, розстановка зубців, технологічний модуль, система тріщин, розклинювання.

**Theoretical researches of change of the tense state of ice and grounded optimum system of placing of indents are expounded. The change in energy intensity of the process of destruction ice layer and the estimation of the quality of cleaning the road surface depending on the arrangement of indents on the body is determined and theoretically justified .**

**Keywords:** ice coverage, crack, destruction, placing of indents, technological module, system of cracks, wedging.

**Изложены теоретические исследования изменения напряженного состояния льда и обоснованно оптимальную систему расстановки зубцов. Определенно и теоретически обоснованно изменение энергоемности процесса разрушения ледового слоя и выполненная оценка качества очистки дорожного покрытия в зависимости от расстановки зубцов на рабочем органе.**

**Ключевые слова:** ледовое покрытие, трещина, разрушение, расстановка зубцов, технологический модуль, система трещин, расклинивания.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Існуючі технології видалення льодових утворень, які утворилися на поверхні дорожнього покриття, зокрема застосування солей, на території міст є недостатньо ефективними, оскільки викликають корозію металічних поверхонь, негативно впливають на дорожнє покриття, шини автомобілів, потрапляючи в ґрунт, на придорожню рослинність, забруднюють стічні води.

**З цієї метою доцільно застосовувати робочі органи, які забезпечували б очищення покриття без його пошкодження та без забруднення навколишнього середовища. До цього часу розробка їх конструкцій, в пе-**

реважній більшості, була спрямована на зменшення тягового опору, і в меншій – на досягнення якісних показників роботи та якості очистки покриттів. За існуючими технологіями необхідна якість очищення покриттів досягається використанням комбінації декількох видів обробки, що призводить до додаткових енерговитрат [2, 5].

**Аналіз досліджень та публікацій.** Вплив на лід динамічним навантаженням з великою амплітудою, але малою частотою призводить до його миттєвого крихкого руйнування від дії хвиль напруження. Умова утворення і поширення хвиль напруження в середовищах при динамічних навантаженнях і їх вплив на руйнування матеріалу розглянуті в монографіях відомих вчених Н.А. Алексєєва, Д.Д. Баркана, Л.І. Барона, В.Л. Баладінського, С.С. Григоряна та багатьох інших. Дослідженню фізико-механічних властивостей льоду і закономірностей його руйнування присвячені роботи Г.Л. Карабана, А.Н. Зеленіна, В.Н. Денісова, Л.С. Мнухіна, В.В. Богородського, В.В. Лаврова, К.Ф. Войтковського та інші. Дослідженнями встановлено, що утворений на дорожньому покритті вулиць і тротуарів лід має явно виражене хаотичне структуроутворення, а величина сил його змерзання з дорожнім покриттям залежить від ряду факторів, в першу чергу, від стану поверхні покриття [1, 2, 6].

У зв'язку з цим актуальною задачею на даний час, є розробка високоефективних робочих органів для видалення льодових утворень, які б дозволили, на основі врахування різних умов утворення покращити показники якості очищення покриття без його пошкодження.

**Викладення матеріалу та результати.** Ефективність роботи льодосколювача суттєво залежить від розстановки зубців в технологічному модулі, яка утворює ту чи іншу систему тріщин руйнування на льодовій поверхні. Тому, вибираючи оптимальну розстановку зубців на робочому органі, можна знизити енергоємність процесу руйнування, збільшити площу руйнування і зменшити розміри фракцій сколеного льоду, забезпечити необхідну якість очищення дорожнього покриття.

Отже, для забезпечення якісної роботи робочого обладнання необхідно створити в льодовому масиві такий напружений стан, щоб відбувалося поширення тріщин руйнування до поверхні дорожнього покриття [3]. При цьому відстань між сусідніми зубцями повинна бути такою, щоб відбувалося взаємне перекриття поля їх напружених станів, що дасть можливість забезпечити повне руйнування шару льодових утворень на покритті (рис. 1).

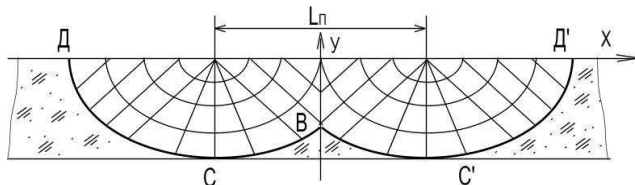


Рис. 1. Схеми перекриття зон напруженого стану

Для вибраної розрахункової схеми руйнування шару льоду розглянемо

два випадки. В першому з них будемо вважати, що зубці розміщені на одній лінії, перпендикулярно до напрямку переміщення льодосколювача, та мають єдиний фронт розвитку тріщин (рис. 2).

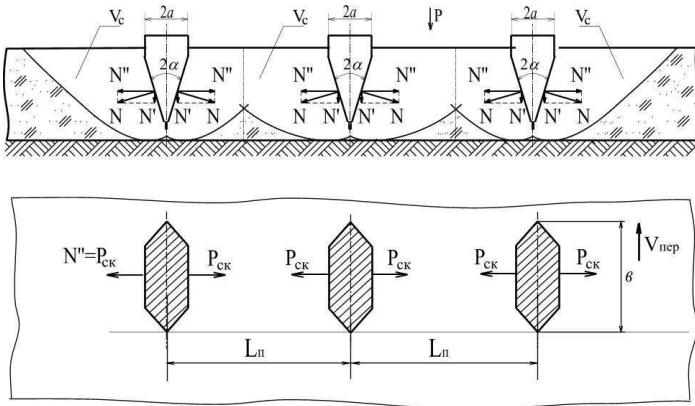


Рис. 2. Принципова схема розстановки робочих зубців в технологічному модулі, де зубці розміщені на одній лінії

На принциповій схемі розстановки робочих зубців в технологічному модулі прийняті позначення:  $L_{\Pi}$  – відстань між повздовжніми рядами паралельних зубців,  $L_{\Pi\Pi}$  – відстань між поперечними рядами паралельних зубців,  $V_C$  – об’єм фактично сколеного льоду,  $P_{СК}$  – сила сколювання льоду,  $P$  – прикладена сила,  $V_{ПЕР}$  – швидкість переміщення машини,  $2\alpha$  – кут загострення зуба,  $a$  – ширина зуба,  $v$  – довжина зуба.

Отже, виходячи із досліджень та розмірів одиночної лунки руйнування, отримуємо параметри розстановки зубців на модулі робочого органу:

$$L_{\Pi} = v + \frac{4\mu \cdot b \cdot P \cdot E \cdot h \cdot \eta \sqrt{\left(\frac{2k}{3}(1-2\mu)\right)^2 - 1}}{v \cdot a \cdot \sigma_0 \cdot k \cdot \sigma_{\text{сд}}}, \quad (1)$$

де  $h$  – величина занурення інструменту  $H$  – товщина льоду,  $\sigma_{\text{сд}}$  – міцність льоду на відрив,  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона,  $\eta$  – коефіцієнт,  $E$  – модуль пружності льоду.

Таким чином, виходячи із виконаних досліджень руйнування нальодів, при блокованих бічних стінках маємо, що зі збільшенням прикладеної сили об’єм сколеного льоду зростає. Враховуючи область напружень, яка виникає під час впровадження зуба, маємо обмеження щодо зони сколювання, оскільки руйнування нальодів за областю напруженого стану не відбувається.

В другому випадку вважаємо, що робочі зубці розміщені в два паралельні ряди, в шаховому порядку, із взаємним перекриттям зони руйнування (рис. 3), перпендикулярно до напрямку переміщення льодосколювача з єдиним фронтом розвитку тріщин.

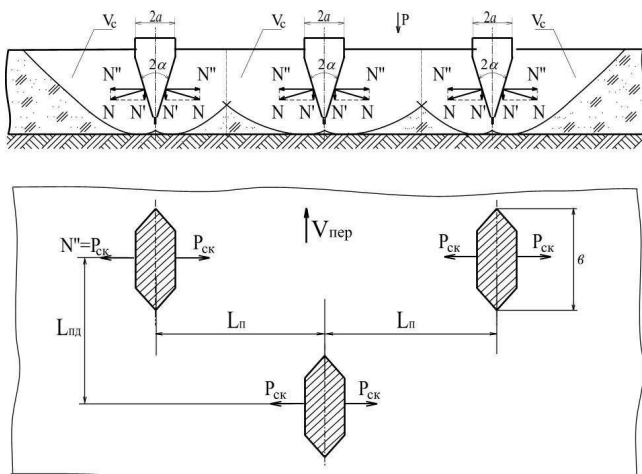


Рис. 3. Принципова схема розстановки робочих зубців в технологічному модулі в шаховому порядку

Слід відзначити, що при впровадженні робочого органу в робоче середовище з відкритими бічними стінками, зруйнована зона збільшується за рахунок появи тріщини, що виходить на бічну поверхню. В цьому випадку, визначальним чинником процесу служить оптимальне значення плеча сколювання, величину якого можна отримати з умови мінімуму енергії необхідною для утворення тріщин сколювання.

Отже, якщо перед подальшим ударом інструмент розташувати поблизу раніше створеної лунки сколювання, то остання гратиме роль додаткової вільної поверхні, хоча і обмеженого розміру, проте відбій вже відбувається спільно і крок руйнування породи слід визначати так:

поперечний крок

$$L_{\Pi} = \frac{2\mu \cdot k_{\phi} \cdot P \cdot E \cdot h \cdot \eta \sqrt{\left(\frac{2k}{3}(1-2\mu)\right)^2 - 1}}{a \cdot v \cdot \sigma_{\text{од}} \cdot k \cdot \sigma_0} + ; \quad (2)$$

$$+ 0,5a + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2P \cdot H - \pi \cdot a \cdot \sigma_{\text{од}} \cdot H^2}{\pi \cdot \sigma_{\text{од}} \cdot a}}$$

поздовжній крок

$$L_{\Pi\Pi} = \epsilon + \frac{4\mu \cdot k_{\phi} \cdot P \cdot E \cdot h \cdot \eta \sqrt{\left(\frac{2k}{3}(1-2\mu)\right)^2 - 1}}{\epsilon^2 \cdot \sigma_{\epsilon 0} \cdot k \cdot \sigma_0}. \quad (3)$$

Враховуючи той факт, що крайні точки інструменту діють не в одному напрямі, а по півсфері, то об'єм породи, що відбивається за один удар при спільному руйнуванні більше, а енергоємність менше на 20-30%, ніж для одиночного руйнування.

Аналізуючи варіанти розстановки зубців на робочому органі та враховуючи енергоємність руйнування льоду, приймаємо другий варіант розміщення робочих зубців у два паралельні ряди, в шаховому порядку, із взаємним перекриттям, перпендикулярно до напрямку переміщення льодосколювача з єдиним фронтом розвитку тріщин.

Для оцінки характеру руйнування робочим органом дуже важливим показником є питома енергія руйнування одиниці об'єму або масиву льоду, що є найбільш узагальненою оцінкою ефективності:

$$q = \frac{A_0}{V_C}. \quad (4)$$

Виходячи з постановочних експериментів, маємо, що форма сколеного об'єму льоду  $V_C$  являє собою частину параболоїда. Рівняння, яке буде описувати зміну залежності висоти не сколеного льоду від осі удару зуба, запишеться наступним чином:

$$y = 0,1x^2 - 1,8x + 8,1. \quad (5)$$

Об'єм сколеного льоду  $V_C$  визначимо, враховуючи величину не сколеного льоду залежно від відстані між двома сусідніми зубцями:

$$V_C = H \cdot t_k \cdot L_{\Pi} - 2 \cdot t_k \int_0^{L_{\Pi}/2} (0,1x^2 - 1,8x + 8,1) dx, \quad (6)$$

$$V_C = H \cdot t_k \cdot n_z \cdot L_{\Pi} - \left( 4\epsilon \left( 0,033 \left( \frac{L_{\Pi}}{2} \right)^3 - 0,9 \left( \frac{L_{\Pi}}{2} \right)^2 + 8,1 \left( \frac{L_{\Pi}}{2} \right) \right) \right) \times \\ \times \left( 2L_{\Pi} \left( 0,033(L_{\Pi} - \epsilon)^3 - 0,9(L_{\Pi} - \epsilon)^2 + 8,1(L_{\Pi} - \epsilon) \right) \right) \quad (7)$$

де  $t_k$  – крок сколювання.

Застосовуючи значення  $V_C$  з врахуванням розстановки зубців на робочому органі, отримаємо енергоємність руйнування льоду ударом:

$$q = \frac{\frac{12\sigma_{cm}^2}{E_\delta} (1 - 2\mu_\delta) \left( \frac{\epsilon}{2} + \vartheta_{nn} \cdot \tau \right) \vartheta_{nn} \cdot \vartheta_{ne} \cdot \tau^2 + 0,95H^{0,88} \left( \pi H \cdot ctg\varphi + \frac{bL_{II}}{2\cos\varphi} \right) \frac{\sigma_{\epsilon\delta} \cdot H}{\sin\varphi} k_S \cdot tg \frac{\alpha}{2} + 0,95H^{0,88} \frac{\pi \cdot \sigma_{\epsilon\delta} (H^2 + \ell_{\epsilon\phi}^2) a}{2H}}{H \cdot t_k \cdot n_z \cdot L_{II} - \left( \epsilon \cdot 4 \left( 0,033 \left( \frac{L_{II}}{2} \right)^3 - 0,9 \left( \frac{L_{II}}{2} \right)^2 + 8,1 \left( \frac{L_{II}}{2} \right) \right) \right) \times \left( 2L_{II} \left( 0,033(L_{III} - \epsilon)^3 - 0,9(L_{III} - \epsilon)^2 + 8,1(L_{III} - \epsilon) \right) \right)} \quad (8)$$

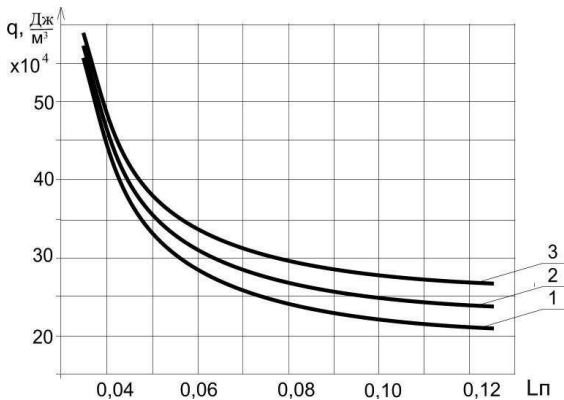


Рис. 4. Залежність питомої енергії руйнування від відстані між сусідніми зубцями:  
при  $H = 0,06$  м; 1 –  $L_{III} = 0,20$  м; 2 –  $L_{III} = 0,15$  м; 3 –  $L_{III} = 0,10$  м

При сколюванні льоду на поверхні дорожнього покриття навіть при поєднанні найсприятливіших умов для руйнування лишається деяка частина несколеного льоду. Для оцінки характеру руйнування робочим органом дуже важливим показником є якість очищення покриття, тому при вибраному розміщенні робочих зубців визначимо даний показник:

$$k_{я} = \frac{V_C}{V_H}, \quad (9)$$

де  $V_H$  – необхідний об'єм зони руйнування льоду.

Номінальний об'єм зони руйнування льоду, тобто об'єм, на який впливає робочий зуб, визначимо, враховуючи прийняте значення кроку сколювання та залежно від відстані між сусідніми зубцями:

$$V_H = H \cdot t_k \cdot L_{II} \quad (10)$$

$$k_{\text{я}} = \frac{t_k \left( H \cdot L_{\text{П}} - 2 \left( 0,033 \left( \frac{L_{\text{П}}}{2} \right)^3 - 0,9 \left( \frac{L_{\text{П}}}{2} \right)^2 + 8,1 \left( \frac{L_{\text{П}}}{2} \right) \right) \right)}{H \cdot t_k \cdot L_{\text{П}}} \quad (11)$$

Визначимо показник якості очищення покриття залежно від відстані між сусідніми зубцями та при різній товщині шару льоду (рис. 5).

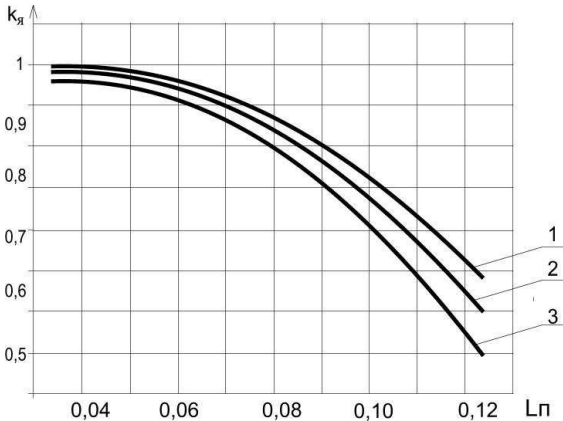


Рис. 5. Залежність якості очищення покриття від відстані між сусідніми зубцями:

при  $H = 0,06$  м; 1 –  $L_{\text{ПД}} = 0,10$  м; 2 –  $L_{\text{ПД}} = 0,15$  м; 3 –  $L_{\text{ПД}} = 0,20$  м

**Висновки.** Аналізуючи отримані теоретичні залежності та результати (рис. 4-5), маємо, що енергоємність зменшується пропорційно зростанню відстані між зубцями, збільшується при збільшенні міцності льоду і при збільшенні кута заострення зубу, якість очищення покриття падає зі збільшенням відстані між сусідніми зубцями. На основі отриманих результатів підбираємо оптимальні параметри розміщення зубців на робочому органі для видалення льодових утворень, які будуть задовольняти мінімальну енергоємність при заданому показнику якості очищення покриття.

1. Баладинский В.Л. Динамическое разрушение грунтов. / В.Л. Баладинский – К., 1971. – 226 с.
2. Баловнев В.И. Дорожно-строительные машины с рабочим органом интенсифицирующего действия. – М.: Машиностроение, 1981. – 223 с.
3. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
4. Панасюк В.В. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие: в 4-х т. / под общей редакцией Панасюка В.В. – Киев: Наук. думка, 1988. – 620 с.
5. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1973. – 584 с.
6. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640с.

Рецензент: к.т.н., професор Сухарев Е.О. (НУВГП)