

УДК 624.074.5

**ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЗМЕРЗЛОГО СНІГУ НА ПОКРІВЛІ ЦИЛІНДРИЧНИХ СІТЧАСТИХ ПОКРИТТІВ ТА ЙОГО УДАРНОЇ ДІЇ НА ПЛОСКІ ПЕРЕШКОДИ**

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ СМЕРЗШЕГОСЯ СНЕГА НА КРОВЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЕТЧАТЫХ ПОКРЫТИЙ И ЕГО УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ПЛОСКИЕ ПРЕПЯТСТВИЯ**

**FEATURES OF MODELING OF MOTION OF SNOW WHICH WAS COLD ON ROOF OF THE CYLINDRICAL RETICULATED COVERINGS AND HIS SHOCK OPERATING ON FLAT OBSTACLES**

**Сіянов О.І., к.т.н., доцент** (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця)

**Сіянов А.И., к.т.н., доцент** (Винницкий национальный технический университет, г. Винница)

**Siyanov O.I., candidate of technical sciences, associate professor** (Vinnytsya National Technical University, Vinnytsya)

Розроблено модель динаміки змерзлого снігу на покрівлю циліндричних сітчастих покриттів і плоску перешкоду. Проаналізовано особливості поведінки масивних кусків льоду. Визначено характерні параметри на усіх етапах руху.

Разработана модель динамики смерзшегося снега на кровлю цилиндрических сетчатых покрытий и плоское препятствие. Проанализированы особенности поведения массивных кусков льда. Определены характерные параметры на всех этапах движения.

The model of dynamics of snow which was cold is worked out on the roof of the cylindrical reticulated coverings and flat obstacle. The features of conduct of massive pieces of ice are analysed. Characteristic parameters on all stages of motion are determinated.

**Ключові слова:**

Покрівля, покриття, сніговий масив, моделювання руху, удар, перешкода.

Кровля, покрытие, снеговой массив, моделирование движения, удар, препятствие.

Roof, covering, snow array, modeling of motion, shock, obstacle.

**Актуальність. Огляд публікацій.** Нині в світі опубліковано значну кількість робіт [1–11], присвячених питанням розвитку теорії розрахунку циліндричних сітчастих покриттів (рис. 1). Кожна публікація висвітлює

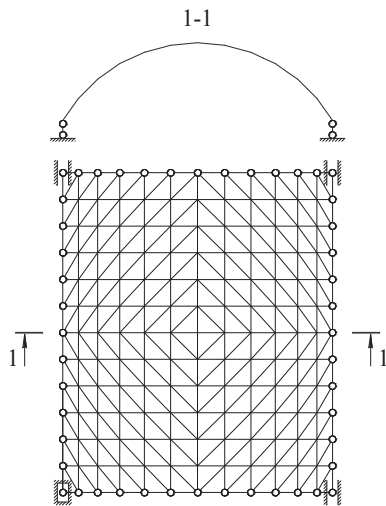


Рис. 1. План і переріз циліндричного сітчастого покриття

власний чи узагальнений підхід із залученим математичним апаратом, здатним розкрити проблему і вирішити важливі та нагальні наукові задачі.

Виявлення значущих факторів і принципів відіграє позиційну та ключову роль для розробки основи вирішальної методології. Причому особливе місце серед багатьох з них відведено значному експлуатаційному навантаженню, яке сприймає конструкція циліндричного сітчастого покриття. Враховується як правило власна вага і комплекс решти статичних навантажень. Але разом або окремо вони сьогодні майже досліджені і не створюють пласт проблемних питань для спеціалістів. Натомість динаміка, яка з'являється від різкої зміни температури зовнішнього повітря і призводить до руху снігу, викликає неабиякий інтерес у фахівців.

Сьогодні майже немає даних, здатних описати вплив рухомого снігового масиву на покрівлю в зимній період року. Відсутні навіть наближені методики розрахунку, оцінки чи пропозиції. Однак кожний схил циліндричних сітчастих покриттів, а особливо положистих може зазнати істотного впливу від рухомого змерзлого снігу на поверхні. Нажаль в сучасних нормах [12] є лише коефіцієнт, завдяки якому можна здійснити перехід від ваги снігового покриву на землі до ваги снігового навантаження на покрівлі. Його значення залежить від кута нахилу захисних елементів покриття і приймається для кожної схеми розподілу снігу окремо. Причому зовсім немає рекомендацій щодо врахування динамічного процесу скочування кусків снігу з поверхні конструкції. Аналогічна ситуація характерна і для закордонної нормативної бази, яка також практично не торкається питання рухомої дії снігового навантаження. Надаються лише вказівки відносно його впливу на деякі конструкції і елементи [13].

Проведений аналіз публікацій і норм призвів до пошуку шляхів вирішення проблеми і дозволив сформулювати та розв'язати ряд задач. Так у попередніх роботах [14–16] здійснено моделювання дії рухомого снігового навантаження на покрівлю циліндричних сітчастих покриттів і розглянуто подальші етапи руху снігу до зіткнення з горизонтальною перешкодою.

**Постановка мети і задач.** Характеристики, які отримані в указаний спосіб справедливі лише для випадку врахування навантаження від елементів снігового масиву в найбільш поширеному сипкому стані. Проте можливий стан, коли внаслідок різкого перепаду температури сніг перетворюється в суцільну глибу. З'являється потреба у визначенні параметрів іншого процесу руху снігового масиву. Поставлені задачі вже давно потребують свого вирішення та формулюють мету, яка полягає в розробці математичної моделі динаміки змерзлого снігу.

**Методика дослідження.** Почнемо з визначення основних передумов і вихідних положень. Згідно з ними сніговий масив у вигляді кусків льоду скочується з покрівлі циліндричного сітчастого покриття за тією ж самою траєкторією, що й в ідеалізованому сипкому середовищі та проходить аналогічні етапи руху. Тому під час моделювання доцільно використати методику, викладену у попередніх роботах. Різниця полягає лише у тому, що слід розглядати цілий кусок льоду, який має значні власні розміри. І хоча габарити змерзлого снігу досить впливові, вони все-таки істотно менші ніж основні геометричні параметри покриття. Такий підхід дозволяє розглядати снігову глибу як тверде тіло [17], обертальним рухом якого можна знехтувати. Тоді вважатимемо, що рух льоду повністю задається рухом його центра мас  $C$ , розташованого на покрівлі покриття, а рівняння руху зберігає вигляд [16]

$$\ddot{\alpha}_c = \frac{1}{R} [g \sin \alpha_c - \mu (g \cdot \cos \alpha_c - R \cdot (\dot{\alpha}_c)^2)], \quad (1)$$

де  $R$  – радіус описаного кола покриття;  $g$  – вектор прискорення вільного падіння;  $\alpha_c$  – кутова координата центра мас куска льоду;  $\mu$  – коефіцієнт тертя.

**Виклад основного матеріалу.** Використовуючи дану методику, виконаємо моделювання і визначимо потрібні параметри впливу.

Задамо початковими умовами

$$\alpha_{cd}(0) = \alpha_{s,cd}, \quad \dot{\alpha}_{cd}(0) = 0. \quad (2)$$

Інтегрування рівняння (1) здійснимо методом Рунге-Кутта до значення кута  $\alpha_{c,d}$ , за яким відбувається відокремлення центра мас  $C$  снігової глиби від поверхні покриття. Для його визначення використаємо умову

$$\Delta m_{c,d} g \cdot \cos \alpha_{c,d} = \frac{\Delta m_{c,d} v_{c,d}^2}{R}, \quad (3)$$

де  $\Delta m_{c,d}$  – маса куска льоду;  $v_{c,d}$  – гранична швидкість.

Після перетворень отримаємо

$$\cos \alpha_{c,d} = \frac{v_{c,d}^2}{gR}. \quad (4)$$

Описання подальшого руху центра мас змерзлого снігу здійснимо за рівняннями [15]

$$\begin{aligned}
 x_c(t) &= x_{c,d} + (v_{c,d} \cdot \cos \alpha_{c,d})(t - t_d), \\
 z_c(t) &= z_{c,d} - (v_{c,d} \cdot \sin \alpha_{c,d})(t - t_d) - \frac{g(t - t_d)^2}{2}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

за умови вільного падіння ( $t \geq t_d$ ) від скочування з поверхні покриття (рис. 2).

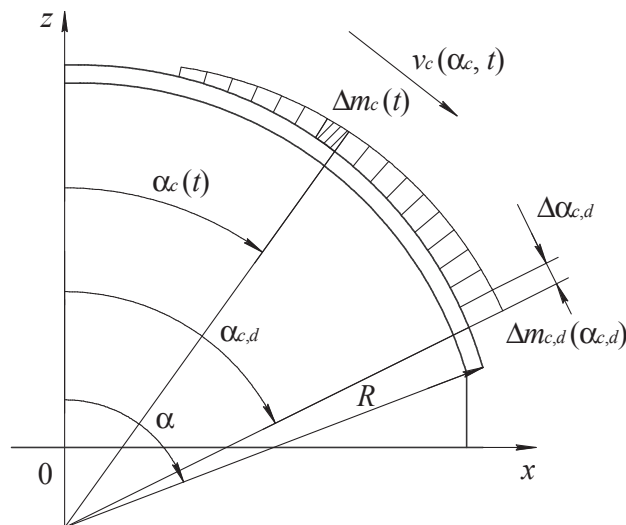


Рис. 2. Фрагмент поперечного перерізу покриття з параметрами змерзлого снігу

Рівняння (5) застосуємо до моменту часу  $t = t_f$ , коли снігова глиба торкається плоскої перешкоди ( $z = 0$ ).

Відбувається удар силою нормального тиску. Для її визначення врахуємо, що снігова глиба, яка має конкретну масу  $M$  і певну довжину  $l$  руйнується під час досягнення перешкоди. Причому куски, отримані внаслідок руйнації не відскакують вгору, а розкидаються на плоскій поверхні.

Позначимо швидкість руху  $v_{c,f}$ , що відповідає часу  $t_f$ .

Тоді до зіткнення дотична до траєкторії компонента кількості руху буде

$$Q_0 = M \cdot v_{c,f}. \tag{6}$$

Після нього

$$Q = 0. \tag{7}$$

Відповідно до теореми про зміну кількості руху, запишемо

$$Q - Q_0 = P \cdot \Delta t, \tag{8}$$

де  $P$  – сила ударного тиску;  $\Delta t$  – тривалість динамічної взаємодії змерзлого снігу і перешкоди.

З урахуванням

$$\Delta t = \frac{l}{v_{c,f}} \quad (9)$$

отримаємо

$$Q - Q_0 = \frac{P \cdot l}{v_{c,f}}. \quad (10)$$

Оскільки в момент удару  $Q = 0$ , то підставивши (6) в (10), знайдемо

$$M \cdot v_{c,f} = \frac{P \cdot l}{v_{c,f}}. \quad (11)$$

В результаті матимемо

$$P = \frac{M \cdot v_{c,f}^2}{l}. \quad (12)$$

Аналогічно розраховуються горизонтальна і вертикальна компоненти сили ударного тиску.

Розкид кусків льоду на плоскій перешкоді після удару можна визначити із рівняння

$$\Delta m_{c,d} \dot{x}_c + \mu \Delta m_{c,d} g = 0, \quad (13)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя.

Звідки отримаємо

$$\dot{x}_c + \mu g = 0, \quad \dot{x}_c = -\mu g t + c_1, \quad x_c = -\frac{\mu g t^2}{2} + c_1 t + c_2. \quad (14)$$

Тут  $t$  – час руху снігової глиби вздовж осі  $Ox$  від початку її контакту з плоскою перешкодою.

Якщо  $t = 0$ , то  $x_c(0) = 0$ ,  $\dot{x}_c(0) = v_{c,d} \cos \alpha_{c,d}$ .

Тоді  $c_1 = v_{c,d} \cos \alpha_{c,d}$ ,  $c_2 = 0$ .

У підсумку матимемо

$$x_c = v_{c,d} \cos \alpha_{c,d} t - \frac{\mu g t^2}{2}, \quad (15)$$

$$\dot{x}_c = v_{c,d} \cos \alpha_{c,d} - \mu g t. \quad (16)$$

З рівності (16) знайдемо, що змерзлий сніг зупиниться в момент часу

$$t_c = \frac{v_{c,d} \cos \alpha_{c,d}}{\mu g}. \quad (17)$$

Пройдений шлях на горизонтальній поверхні у такому випадку буде

$$X_f = \frac{(v_{c,d} \cos \alpha_{c,d})^2}{\mu g} - \frac{\mu g}{2} \left( \frac{v_{c,d} \cos \alpha_{c,d}}{\mu g} \right)^2 = \frac{(v_{c,d} \cos \alpha_{c,d})^2}{2\mu g}. \quad (18)$$

**Висновки.** Здійснено моделювання динаміки змерзлого снігу на покрівлю циліндричних сітчастих покриттів і плоску перешкоду та визначено залежності і параметри усіх етапів руху. Використано модель ідеалізованого сипкого середовища і розглянуто снігове навантаження у вигляді масивних кусків льоду. Отримано показник сили ударного тиску снігової глиби і знайдено параметр для визначення величини зони розкиду її частин на горизонтальній поверхні. Розроблено методику розрахунку характеристик динамічного процесу руху змерзлого снігу за умови відокремлення від покрівлі, в момент падіння, зіткнення та подальшого контакту з плоскою перешкодою.

1. Попов И. Г. Цилиндрические стержневые системы / И. Г. Попов. – Л.; М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. – 112 с. 2. Райт Д. Т. Большие сетчатые оболочки / Д. Т. Райт. – Л. : Стройиздат, 1966. – 11 с. 3. Патцельт О. Стальные решетчатые пространственные конструкции / О. Патцельт ; пер. с нем. – М. : ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. – 95 с. 4. Лубо Л. Н. Руководство по проектированию и расчету покрытий нового типа – сетчатых оболочек / Л. Н. Лубо. – Л. : ЛенЗНИИЭП. 1971. – 63 с. 5. Свердлов В. Д. Исследование пространственных цилиндрических стержневых систем покрытий : дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук 05.23.01 / Свердлов Владимир Деонисович. – К., 1977. – 174 с. – Библиогр.: С. 153–161. 6. Пшеничнов Г. И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок / Г. И. Пшеничнов. – М. : Изд-во «Наука», 1982. – 352 с. 7. Лебедев В. А. Сетчатые оболочки в гражданском строительстве на севере / В. А. Лебедев, Л. Н. Лубо. – Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 136 с. 8. Трущев А. Г. Пространственные металлические конструкции : учеб. пос. для вузов / А. Г. Трущев. – М. : Стройиздат, 1983. – 215 с. 9. Свердлов В. Д. Металеві циліндричні стержневі покриття : монографія / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 134 с. 10. Гоцуляк Є. О. Загальна стійкість одношарових циліндричних стержневих покриттів / Є. О. Гоцуляк, О. І. Сіянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 1. – С. 13–18. 11. Сіянов О. І. Металеві циліндричні стержневі покриття: конструювання та розрахунок : монографія / О. І. Сіянов. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 140 с. 12. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування / Мінбуд України. – К. : Вид-во «Сталь», 2006. – 60 с. 13. RACE Central Advice Unit. Guide to Requirements for Office Buildings. Edition 3 : March 1998. 14. Сіянов О. І. Особливості моделювання дії рухомого снігового навантаження на покрівлю циліндричних сітчастих покриттів / О. І. Сіянов // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2014. – Вип. 29. – С. 499–505. 15. Сіянов О. І. Вільне падіння елементів снігового масиву з покрівлі циліндричних сітчастих покриттів та його ударна дія на плоскі перешкоди / О. І. Сіянов // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2015. – Вип. 30. – С. 411–416. 16. Сіянов О. І. Моделювання дії рухомого снігового масиву на покрівлю циліндричних сітчастих покриттів та оточуючі об'єкти / О. І. Сіянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 1. – С. 17–21. 17. Пановко Я. Г. Механика деформируемого твердого тела: современные концепции, ошибки и парадоксы / Я. Г. Пановко. – М. : Наука, 1985. – 288 с.