

**БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ**

УДК 624.074.5

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХОМОГО СНІГОВОГО МАСИВУ В МОМЕНТ  
ВІДОКРЕМЛЕННЯ ВІД ПОКРІВЛІ ЦИЛІНДРИЧНИХ СІТЧАСТИХ ПОКРИТТІВ І НА  
ПОДАЛЬШИХ ЕТАПАХ РУХУ**

О. І. Сіянов, Д. В. Антонюк

*Виконано моделювання і розроблена методика визначення параметрів та співвідношень рухомого снігового масиву в момент відокремлення від покрівлі циліндричних сітчастих покриттів і на подальших етапах руху. Знайдено характеристики рухомого снігового масиву під час зісковзування з покрівлі, в процесі падіння, зіткнення та подальшого контакту з горизонтальною поверхнею. Визначено величину зони розкиду снігу. Отримано можливість розраховувати швидкість і значення кута, за якими елемент снігового масиву відокремлюється від покрівлі і здійснює падіння за балістичною кривою, обчислювати координати траєкторії вільного падіння та визначати пройдений шлях елементів снігу на горизонтальній поверхні.*

**Ключові слова:** циліндричні сітчасті покриття, покрівля, параметри, моделювання, рухомий сипкий сніговий масив.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДВИЖНОГО СНЕГОВОГО МАССИВА В МОМЕНТ  
ОТДЕЛЕНИЯ ОТ КРОВЛИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЕТЧАТЫХ ПОКРЫТИЙ И НА  
ДАЛЬНЕЙШИХ ЭТАПАХ ДВИЖЕНИЯ**

А. И. Сиянов, Д. В. Антонюк

*Выполнено моделирование и разработана методика определения параметров и соотношений подвижного снегового массива в момент отделения от кровли цилиндрических сетчатых покрытий и на дальнейших этапах движения. Найдены характеристики подвижного снегового массива во время соскальзывания с кровли, в процессе падения, столкновения и дальнейшего контакта с горизонтальной поверхностью. Определена величина зоны разброса снега. Получена возможность рассчитывать скорость и значение угла отделения элемента снегового массива от кровли с последующим падением по баллистической кривой, вычислять координаты траектории свободного падения и определять пройденный путь элементов снега на горизонтальной поверхности.*

**Ключевые слова:** цилиндрические сетчатые покрытия, кровля, параметры, моделирование, подвижной сыпучий снеговой массив.

**DETERMINATION OF PARAMETERS OF MOBILE SNOW MASS IN THE MOMENT OF  
DISSOCIATING FROM ROOF OF THE CYLINDRICAL RETICULATED COVERINGS AND  
ON THE FURTHER STAGES OF MOTION**

O. Siyanov, D. Antonuk

*A modeling is executed and the method of determination of parameters and correlations of mobile snow array is created out in the moment of dissociating from the roof of the cylindrical reticulated coverings and on the further stages of motion. Characteristics of mobile snow array are found during sliding off from a roof, in the process of falling, blow and further contact with a horizontal surface. The size of area of variation of snow is certain. Possibility of calculation of speed and value of corner of separation of snow array cell from a roof with the subsequent falling to direction with ballistic curve is got, are calculated the co-ordinates of trajectory of the free falling and is determined the way of moving of elements of snow on a horizontal surface.*

**Keywords:** cylindrical reticulated coverings, roof, parameters, modeling, mobile fragment of snow mass.

### Постановка проблеми. Огляд публікацій

Уже понад десятиліття сніговому навантаженню на конструкції покриттів приділяється значна увага. Головна причина такої зацікавленості фахівців викликана змінами кліматичних зон в Україні. Особливо уразливі до дії снігового навантаження циліндричні сітчасті покриття. В їх конструкції від поступового скупчування снігової товщі на покрівлі виникають деформації середніх і опорних ділянок, відбувається зміщення великої кількості вузлів та викривлення загальної форми покриття. Причому за умови забезпечення раціональних граничних умов [1, 2] незалежно від габаритних розмірів і співвідношення геометричних параметрів істотного впливу зазнають обидва схили просторової конструкції.

Проведений аналіз інформаційних джерел [3–14] показав, що універсальної методики розрахунку параметрів снігового навантаження поки що не існує. В чинному нормативному документі [5] наведені положення відносно врахування статичної складової силового впливу від снігу, однак не враховано тривалість різких перепадів температури зовнішнього повітря. Разом з тим зрозуміло, що збільшення частки морозних днів забезпечує перехід снігової товщі в льодовий стан і спричиняє якісно іншу дію на покрівлю та оточуючі об'єкти. Окрім сил тяжіння від статичного стану розташування снігу на покритті з'являється активний вплив динамічних навантажень.

Переважну більшість параметрів і значень можна отримати з попередньої роботи [8] розглянувши рух снігового масиву до ударної взаємодії з горизонтальною поверхнею. Проте, їх співвідношення є недостатніми для визначення усіх складових динамічного процесу. Не відомі характеристики руху снігового навантаження в момент зісковзування з покрівлі, в процесі його вільного падіння і після нього та не визначена величина зони розкиду снігу.

### Мета і задачі роботи

Враховуючи зазначені питання, поставлено *мету* – встановити усі складові динамічного процесу і змоделювати дію рухомого снігового навантаження у випадку втрати контакту його елементів з криволінійною поверхнею. Отримання необхідних параметрів і співвідношень руху снігового масиву в момент відокремлення від покрівлі циліндричних сітчастих покриттів, в момент падіння, зіткнення та подальшого контакту його з горизонтальною поверхнею формулюють *задачі*, які потрібно вирішити.

### Визначальні передумови і співвідношення

Як вже зазначалося раніше [8], згідно з припущенням, сніговий масив характеризується сипким станом з незв'язаними між собою елементами, що відповідає моделі ідеалізованого сипкого середовища.

Задача про рух снігу має аналітичне рішення, якщо коефіцієнт тертя  $\mu$  дуже малий і ним можна знехтувати. Тоді для кожного  $i$ -го елемента масиву рівняння руху по покрівлі циліндричного сітчастого покриття приводиться до вигляду

$$\frac{dy_i}{dt} = g \sin \alpha_i. \quad (1)$$

Рівняння має рішення у формі

$$v_i(\alpha) = \sqrt{2gR(\cos \alpha_{s,i} - \cos \alpha_i)}, \quad (2)$$

де  $R$  – радіус кривизни покрівлі;  $\alpha_{s,i}$  – кутова координата  $i$ -го елемента снігового масиву в початковому (нерухомому) стані;  $\alpha_i$  – його кутова координата у поточному стані.

Елементи снігового масиву в процесі зсунення на покрівлі рухаються з різними швидкостями, що призводить до збільшення кутових розмірів  $\Delta \alpha_i$  і зменшення погонної маси  $m_i(\alpha_i, t)$ .

**Визначення параметрів руху снігового масиву з моменту відокремлення від покрівлі до зіткнення з горизонтальною поверхнею**

Коли  $i$ -тий елемент досягає граничної швидкості  $v_{d,i}$ , то відцентрова сила інерції  $\Delta m_i v_i^2 \cdot \bar{n}_i / R$ , що на нього діє, стає рівною складовій силі тяжіння  $\Delta m_i g \cos \alpha_i n_i$ , яка є нормальною до поверхні покрівлі. Тоді  $i$ -тий елемент виявляється поза контактом з поверхнею покрівлі (рис. 1), що забезпечує йому вільне падіння до зіткнення з горизонтальною поверхнею [8].

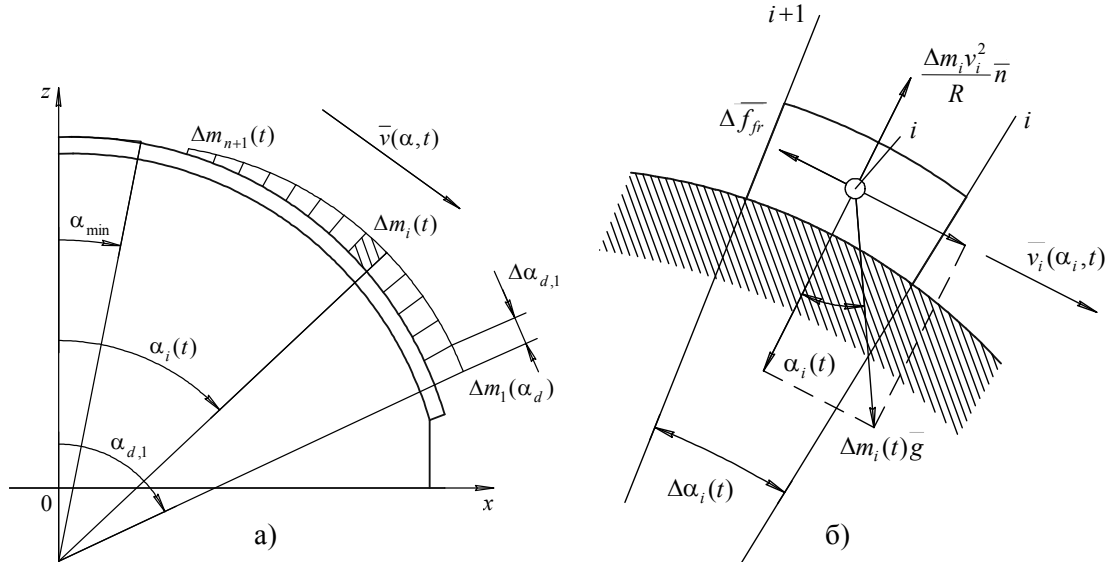


Рисунок 1 – Геометрична схема снігового масиву в момент  $t_d$  відокремлення  $i$ -того елемента (а) і схема динамічного стану елемента снігового масиву (б)

В момент відокремлення  $i$ -го елемента снігового масиву нормальна компонента сили тяжіння врівноважується відцентровою силою інерції, тому

$$\Delta m_i g \cos \alpha_{d,i} = \Delta m_i v_{d,i}^2 / R. \quad (3)$$

З урахуванням (2) отримаємо

$$\Delta m_i g \cos \alpha_i = \Delta m_i 2gR(\cos \alpha_{s,i} - \cos \alpha_i) / R. \quad (4)$$

Спростивши рівняння (4), будемо мати

$$3 \cos \alpha_i = 2 \cos \alpha_{s,i} \text{ або } \alpha_{d,i} = \arccos(2 \cos \alpha_{s,i} / 3). \quad (5)$$

Використовуючи (5) можна розрахувати значення кута  $\alpha_{d,i}$ , за яким  $i$ -тий елемент снігового масиву відокремлюється від покрівлі і здійснює падіння за балістичною кривою.

Траєкторію такого падіння за умови  $t \geq t_{d,i}$  в системі координат  $0xz$  можна подати рівностями

$$\begin{aligned} x_i(t) &= x_{d,i} + (v_{d,i} \cos \alpha_{d,i})(t - t_{d,i}), \\ z_i(t) &= z_{d,i} - (v_{d,i} \sin \alpha_{d,i})(t - t_{d,i}) - \frac{g(t - t_{d,i})^2}{2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Рівності (6) потрібно використовувати до моменту досягнення координатою  $z_i(t)$  значення  $z_i(t) = 0$  коли відбувається зіткнення з горизонтальною поверхнею ( $t_{f,i}$ ).

**Визначення зони розкиду снігу на горизонтальній поверхні**

У випадку  $t = t_{f,i}$  вертикальна компонента  $z_{f,d}$  швидкості  $i$ -го елемента снігу повністю гаситься, а горизонтальна може бути визначена за рівністю  $\dot{x}_{f,i} = v_{d,i} \cos \alpha_{d,i}$ . Тому, якщо на горизонтальній поверхні немає вертикальної перешкоди, то сніговий масив після падіння буде здійснювати рух вздовж осі  $Ox$  поки не зупиниться від дії сил тертя.

Для визначення шляху  $X_{f,i}$ , який пройде  $i$ -тий елемент по горизонтальній поверхні, складемо рівняння

$$\Delta m_i \dot{x}_i + \mu \Delta m_i g = 0, \tag{7}$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя.

Звідки отримаємо

$$\dot{x}_i + \mu g = 0, \quad \dot{x}_i = -\mu g t + c_1, \quad x_i = -\frac{\mu g t^2}{2} + c_1 t + c_2. \tag{8}$$

Тут  $t$  – час руху  $i$ -го елемента вздовж осі  $Ox$  від початку його контакту з горизонтальною поверхнею.

Якщо  $t = 0$ , то  $x_i(0) = 0$ ,  $\dot{x}_i(0) \neq v_{d,i} \cos \alpha_{d,i}$ . Тоді  $c_1 = v_{d,i} \cos \alpha_{d,i}$ ,  $c_2 = 0$ .

У підсумку матимемо

$$x_i = v_{d,i} \cos \alpha_{d,i} t - \frac{\mu g t^2}{2}, \tag{9}$$

$$\dot{x}_i = v_{d,i} \cos \alpha_{d,i} - \mu g t. \tag{10}$$

З рівності (10) знайдемо, що  $i$ -тий елемент снігового масиву зупиниться в момент часу

$$t_i = \frac{v_{d,i} \cos \alpha_{d,i}}{\mu g}. \tag{11}$$

Пройдений шлях у такому випадку буде

$$X_{f,i} = \frac{(v_{d,i} \cos \alpha_{d,i})^2}{\mu g} - \frac{\mu g}{2} \left( \frac{v_{d,i} \cos \alpha_{d,i}}{\mu g} \right)^2 = \frac{(v_{d,i} \cos \alpha_{d,i})^2}{2\mu g}. \tag{12}$$

**Висновки**

- Виконано моделювання і розроблена методика визначення параметрів та співвідношень рухомого снігового масиву в момент відокремлення від покрівлі циліндричних сітчастих покриттів і на подальших етапах руху.
- Знайдено характеристики рухомого снігового масиву під час зісковзування з покрівлі, в процесі падіння, зіткнення та подальшого контакту з горизонтальною поверхнею. Визначено величину зони розкиду снігу.
- Отримано можливість розраховувати швидкість і значення кута, за якими елемент снігового масиву відокремлюється від покрівлі і здійснює падіння за балістичною кривою, обчислювати координати траєкторії вільного падіння та визначати пройдений шлях елементів снігу на горизонтальній поверхні.

**Використана література**

1. Свердлов В. Д. Цилиндрическое пространственное стержневое покрытие (теоретическое и экспериментальное исследование) / В. Д. Свердлов // Строительные конструкции : сб. науч. тр. –

- Київ : Будівельник, 1978. – Вып. 31. – С. 124–130.
2. Сіянов О. І. Визначення силових факторів і параметрів деформування металевих циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 20–25.
  3. Сіянов О. І. Особливості моделювання дії рухомого снігового навантаження на покрівлю циліндричних сітчастих покриттів / О. І. Сіянов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2014. – Вип. 29. – С. 499–505.
  4. Сіянов О.І. Вільне падіння елементів снігового масиву з покрівлі циліндричних сітчастих покриттів та його ударна дія на плоскі перешкоди / О. І. Сіянов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2015. – Вип. 30. – С. 411–416.
  5. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи / Мінбуд України. – К. : вид-во «Сталь», 2006. – 60 с.
  6. Арафайлов С. И. Двумерная задача об ударе лавинного потока о преграду / С. И. Арафайлов, В. С. Кулибаба, М. Э. Эглит // Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Л75 16–25 апреля 2007 г., Москва, МГУ им. М. В. Ломоносова. – М. : изд-во Московского университета, 2007. – С. 24.
  7. Куликовский А. Г. Двумерная задача о движении снежной лавины по склону с плавно меняющимися свойствами / А. Г. Куликовский, М. Э. Эглит // ПММ, 1973, т. 37, вып. Б. – С. 837–848.
  8. 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.
  9. McClung D. M. Characteristics of flowing snow and avalanche impact pressures / D. M. McClung, P. A. Schaerer // Annals of Glaciology, 1985, No 6. – P. 9–14.
  10. Gruber U. Avalanche hazard mapping using numerical Voellmy-fluid models / U. Gruber, P. Bartelf, H. Haefner // NGI, Oslo, pub. Nr. 203, 1998. – P. 117–121.
  11. Hermann F. Laboratory experiments on the dynamics of powder snow avalanches / F. Hermann, J. Hermann, K. Hutter // Avalanche Formation, Movement and Effects (Proceedings of the Davos Symposium, September 1986). IAHS Publ. No 162, 1987. – P. 431–440.
  12. Kurahashi I. Estimation of snow load of large-scale inclined roof of Tajima Dome / I. Kurahashi, A. Honda // Snow Engineering. Recent Advances and Developments. – Rotterdam: A. A. Balkema, 2000. – P. 195–199.
  13. Leaf C. F. Avalanche Dynamics / C. F. Leaf, M. Jr. Martinelli // Engineering applications for land use planning: USDA For. Serv. Res. Pap. RM-183, 1977. – 51 p.
  14. Nakamura H. Impact forces of snow blocks sliding down from roofs against walls (in Japanese) / H. Nakamura, O. Abe, T. Nakamura // National Research Centre for Disaster Prevention, Japan, Report No. 25, 1981. – P. 169–189.

**Сіянов Олександр Ілліч** – к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету.

**Антонюк Дмитро Васильович** – студент Вінницького національного технічного університету.

**Сиянов Александр Ильич** – к.т.н., доцент кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры Винницкого национального технического университета.

**Антонюк Дмитрий Васильевич** – студент Винницкого национального технического университета.

**Alexander Siyanov** – Ph.D., assistant professor department of construction, architecture and municipal economy Vinnytsia National Technical University.

**Dmitry Antonuk** – student Vinnytsia National Technical University.