



ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ТАНЕННЯ СНІГУ НА ПОКРІВЛІ

І. В. Молька, Б. А. Кутний

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна, 36011.

e-mail: Molka_I.V@mail.ru

Отримана 12 жовтня 2009; прийнята 27 листопада 2009.

Анотація. Розроблено метод розрахунку швидкості танення снігу на покрівлі. Запропоновано математичну модель танення снігу на покрівлі з урахуванням впливу теплофізичних характеристик покриття та снігового покриву на тепловий режим конструкції та швидкість танення снігу. Складено рівняння теплового балансу для площини контакту покрівлі зі снігом. Виведено формули для визначення лінійної швидкості танення снігу через будь-який інтервал часу після його випадання на покрівлю та залишкової товщини снігу в кожен момент часу. Наведено приклад розрахунку й виконано порівняння отриманих результатів з дослідними даними, одержаними в результаті експериментів, що проводилися в ПолтНТУ. Подано графіки зміни товщини снігу з часом, а також залежності інтенсивності танення снігу від термічного опору покриття за розрахунковими й дослідними даними. Викладена методика може використовуватися для швидких орієнтовних розрахунків інтенсивності танення снігу на покрівлі при заданих значеннях температур внутрішнього та зовнішнього повітря, термічного опору покриття та теплотехнічних характеристик снігового покриву. Результати досліджень можуть бути корисні для аналізу несучої здатності та теплового режиму будівельних конструкцій.

Ключові слова: сніг, танення, теплообмін, теплопровідність, покриття, сніговий покрив.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ТАЯНИЯ СНЕГА НА ПОКРЫТИИ

И. В. Молька, Б. А. Кутный

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,

Первомайский проспект, 24, г. Полтава, Украина, 36011.

e-mail: Molka_I.V@mail.ru

Получена 12 октября 2009; принята 27 ноября 2009.

Аннотация. Разработано метод расчета скорости таяния снега на покрытии. Предложена математическая модель таяния снега на кровле с учетом влияния теплофизических характеристик покрытия и снежного покрова на тепловой режим конструкции и скорость таяния снега. Составлено уравнение теплового баланса для плоскости контакта кровли со снегом. Выведены формулы для определения линейной скорости таяния снега через любой интервал времени после его выпадания на кровлю и остаточной толщины снега в каждый момент времени. Приведен пример расчета и выполнено сравнение полученных результатов с опытными данными, полученными в результате проведенных в ПолтНТУ экспериментов. Представлены графики изменения толщины снега во времени, а также зависимости интенсивности таяния снега от термического сопротивления покрытия по расчетным и опытным данным. Изложенная методика может использоваться для быстрых ориентировочных расчетов интенсивности таяния снега на покрытии при заданных значениях температур внутреннего и наружного воздуха, термического сопротивления покрытия и теплотехнических характеристик снежного покрова. Результаты исследований могут быть полезны для анализа несущей способности и теплового режима строительных конструкций.

Ключевые слова: снег, таяние, теплообмен, теплопроводность, покрытие, снежный покров.

DEFINITION OF SNOW THAWING SPEED ON THE COVERING

I.V. Molka, B.A. Kutnyj

Poltava National Engineering University after Jury Kondratyuk,

Pershotravnevyy avenue, 24, Poltava, Ukraine, 36011.

*e-mail: Molka_I.V@mail.ru**Received 12, October 2009; accepted 27 November 2009.*

Abstract. A method of calculation of snow thawing speed on the covering has been developed. The mathematical model of snow thawing on a roof taking into account influence of physical characteristics of a roof and snow cover on the thermal mode of a construction and snow thawing speed is offered. The equation of thermal balance for a plane a roof with snow contact has been made up. Formulas for definition of linear speed of snow thawing by means of time interval after its falling on a roof and the residual thickness of snow at the each moment of time are deducted. The example of calculation and comparison of the received results with the experimental data obtained in Poltava National Engineering University has been represented. Diagrams of snow thickness changing in time, have been given as well as dependences of intensity of snow thawing on thermal resistance of a roof with the help of calculated and experimental data are presented. The given technology can be used for fast approximate calculations of snow thawing intensity on a roof at given temperatures values of the internal and external air, thermal resistance of a covering and physical characteristics of the snow covering. Results of researches can be useful for the bearing ability analysis and the building structures thermal mode.

Keywords: snow, thawing, heat exchange, heat conductivity, roof, snow cover.

Для дослідження снігових навантажень на покриття опалюваних будівель [1, 2, 3] необхідно знати товщину снігового покриву на поверхні покриття у різні моменти часу, а також швидкість танення снігу. Особливістю процесу танення є залежність теплового режиму огорожуючої конструкції від товщини снігового покриву, яка постійно змінюється в процесі танення.

Першою опублікованою роботою, де розглядалися задачі з переходом речовини з однієї фази в іншу є робота Стефана [5], присвячена вивченню товщини полярного льоду. Внаслідок цього задачі про промерзання та танення отримали назву «задачі Стефана». Їх особливістю є наявність рухливої поверхні розділу фаз. На ній відбувається поглинання або виділення тепла. При цьому термічні властивості фаз з обох боків рухливої поверхні можуть бути різними, тому така задача досить важка. Відомо ряд аналітичних і цифрових методів розв'язування окремих задач такого типу. Головною проблемою існуючих аналітичних методів розв'язування цієї задачі є її різке ускладнення при незначному ускладненні мате-

матичної моделі [6, 7, 8]. Цифрові методи накладають свої обмеження [9, 10, 12]. Наприклад, при застосуванні методу кінцевих різниць наявний жорсткий зв'язок між часовим кроком і кроком по координаті [9, 10, 11, 13].

Дослідження літературних джерел [5-13] указують на необхідність удосконалення математичної моделі танення снігу на покрівлі.

Метою роботи є розроблення математичної моделі танення снігу на покрівлі з урахуванням впливу теплофізичних характеристик покриття й снігового покриву на тепловий режим конструкції та швидкість танення снігу.

Для аналізу процесів теплообміну на поверхні та всередині покриття, вкритого шаром снігу, розглянемо її розрахункову схему, зображену на рис.1.

Для визначення швидкості танення снігу розглянемо тепловий баланс площини контакту поверхні покрівлі та снігу. Рівняння теплового балансу для даної системи матиме вигляд:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3, \quad (1)$$

де Q_1 – тепловий потік, що надходить із при-
міщення до поверхні контакту снігу з покрівлею,

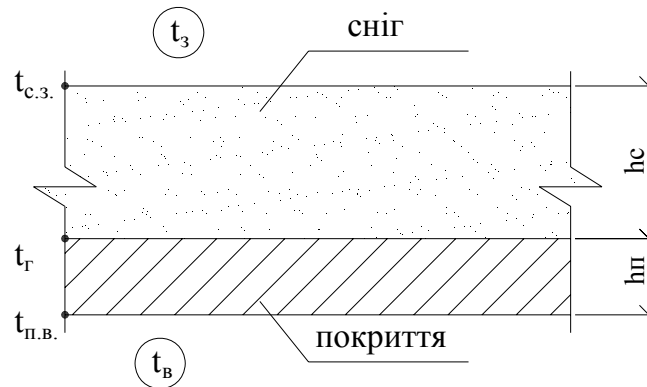


Рис. 1. Розрахункова схема покриття з шаром снігу.

Вт; Q_2 – тепловий потік, що використовується на танення снігу, Вт; Q_3 – тепловий потік, що втрачається з поверхні снігового покриву в навколишнє середовище, Вт.

Тепловий потік, що надходить до зовнішньої поверхні покриття, Вт

$$Q_1 = \frac{F}{R_n} (t_{\theta} - t_z), \quad (2)$$

де F – площа поверхні покрівлі, m^2 ; t_{θ} – температура в приміщенні, $^{\circ}C$;

t_z – температура в пограничному шарі між снігом та покриттям, $^{\circ}C$;

R_n – термічний опір покриття від нижньої поверхні до перерізу, що розглядається, $(m^2 \cdot ^{\circ}C)/Вт$, визначається за формулою:

$$R_n = \frac{1}{\alpha_{\theta}} + \frac{\delta_n}{\lambda_n}, \quad (3)$$

де α_{θ} – коефіцієнт теплообміну біля внутрішньої поверхні покриття, $Вт/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$; δ_n – товщина покриття, м; λ_n – коефіцієнт теплопровідності матеріалу покриття (або приведений коефіцієнт теплопровідності багат шарового покриття), $Вт/(m \cdot ^{\circ}C)$.

Тепловий потік, що використовується на танення снігу, Вт

$$Q_2 = r \cdot \frac{dm}{d\tau}, \quad (4)$$

r – питома теплота танення снігу, Дж/кг; m – маса снігу, кг; $d\tau$ – елементарний проміжок часу, с. З урахуванням фізичних характеристик снігового покриву, швидкість танення снігу, кг/с

$$\frac{dm}{d\tau} = \rho \cdot F \cdot \delta'_c, \quad (5)$$

де ρ – густина снігу, $кг/м^3$; F – площа поверхні, $м^2$; $\delta'_c = \frac{d\delta_c}{d\tau}$ – товщина шару снігу, що розтав за елементарний проміжок часу, м/с.

Тепловий потік, що проходить через шар снігу, Вт

$$Q_3 = \frac{F}{R_c} (t_z - t_3), \quad (6)$$

де F – площа поверхні, $м^2$; t_3 – температура зовнішнього повітря, $^{\circ}C$; R_c – термічний опір шару снігу, $(m^2 \cdot ^{\circ}C)/Вт$. Опір теплопередачі снігу залежить від його товщини і визначається за формулою, $(m^2 \cdot ^{\circ}C)/Вт$

$$R_c = \frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta_c}{\lambda_c}, \quad (7)$$

де α_3 – коефіцієнт теплообміну біля зовнішньої поверхні покриття, $Вт/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$; δ_c – товщина всього шару снігу, м; λ_c – коефіцієнт теплопровідності снігу, $Вт/(m \cdot ^{\circ}C)$.

Під час танення товщина снігу поступово зменшується. Приймавши початкову товщину шару снігу рівною h_c , можна знайти його товщину на покритті в кожен момент часу, що пройшов після початку танення, м

$$\delta_c = h_c - \int_0^{\tau} \delta'_c d\tau, \quad (8)$$

де τ – інтервал часу, що пройшов після початку танення снігу, с.

Підставляючи значення теплових потоків в рівняння (1), можна знайти лінійну швидкість танення снігу через будь-який інтервал часу після його випадання на покрівлю, м/с

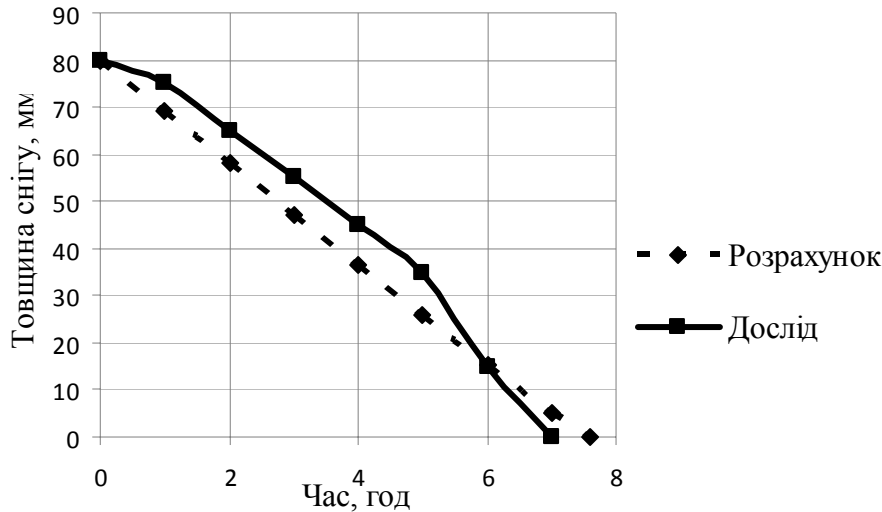


Рис. 2. Зміна товщини снігу з часом.

$$\delta'_c = \frac{\frac{(t_g - t_2)}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} - \frac{(t_2 - t_3)}{\frac{1}{\alpha_3} + \frac{h_c - \int_0^\tau \delta'_c \cdot \tau}{\lambda_c}}}{\rho_c \cdot r} \quad (9)$$

Процес танення буде тривати до тих пір, доки весь сніг не розтане ($\delta_c = 0$), або доки температура граничного шару не опуститься нижче $t_2 < 0^\circ\text{C}$.

Для перевірки розробленої математичної моделі порівнюємо результати розрахунку з результатами натурних експериментів.

Приклад:

Визначити швидкість танення снігу на поверхні бетонного покриття. Вихідні дані: $\delta_n = 0,05$ м, $\alpha_n = 0,145$ Вт/(м·°C), $\delta_c = 0,08$ м, $\alpha_c = 0,114$ Вт/(м·°C), $t_g = 20^\circ\text{C}$, $t_3 = -5^\circ\text{C}$, $\rho_c = 200$ кг/м³.

Граничну температуру між снігом, що тане, та покриттям приймаємо $t_2 = 0^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплообміну біля внутрішньої та зовнішньої поверхонь відповідно: $\alpha_g = 13,5$ Вт/(м²·°C), $\alpha_3 = 23$ Вт/(м²·°C). Питома теплота танення снігу становить $\rho = 330000$ Дж/кг.

Підставивши відповідні значення у формулу (9), після спрощень одержимо:

$$\delta'_c = 0,659 \cdot 10^{-6} - \frac{8,64 \cdot 10^{-9}}{4,96 \cdot 10^{-3} + h_c - \int_0^\tau \delta'_c \cdot d\tau} \quad (10)$$

Для виконання розрахунків за формулою (10) доцільно використовувати розрахункову програму, складену в середовищі QBasic. Результати розрахунку та їх порівняння з дослідними даними [14], отриманими в описаних вище умовах, представлено на рис. 2.

Для визначення інтенсивності танення снігу використовується залежність:

$$I = \frac{h_c}{\tau} \quad (11)$$

де h_c – товщина снігу, мм, що розтанув за інтервал часу τ , с.

Порівняння розрахункових і дослідних значень інтенсивності танення снігу на покритті залежно від його термічного опору подано на рис. 3.

Аналіз отриманих результатів вказує на добре співпадання теоретичних розрахунків загального часу танення з експериментальними даними, що є достатнім у випадку, коли важливий результат і не цікавлять значення на проміжних етапах. Як видно з рис. 3, інтенсивність танення, розрахована на основі результатів, отриманих для різних типів покриття, цілком відповідає експериментальним значенням.

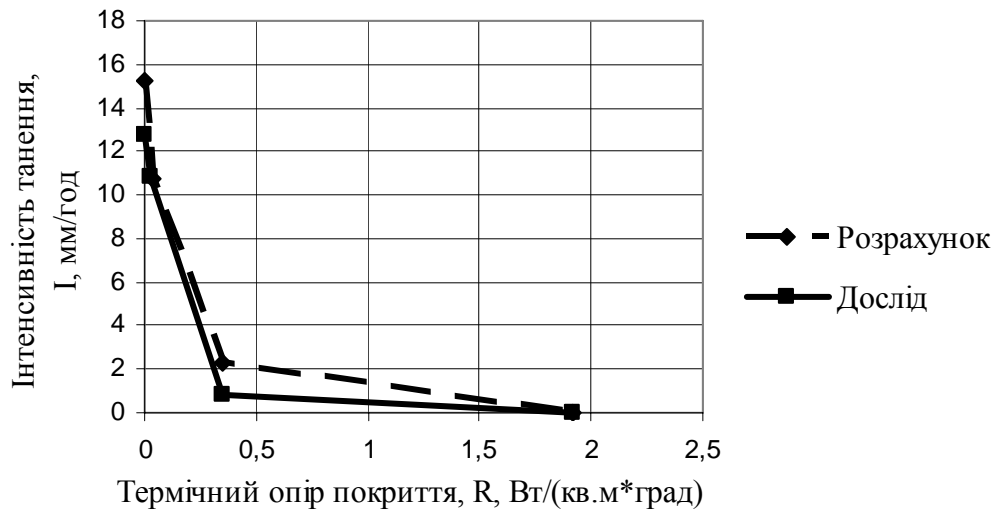


Рис. 3. Залежність інтенсивності танення снігу від термічного опору покриття.

Розбіжність для $R=0,35$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт викликана можливою погрішністю експерименту внаслідок відхилення реального опору теплопередачі від розрахункового.

Викладену методику можна використовувати для розрахункового визначення інтенсивності танення снігу на покрівлі при заданих значеннях температури внутрішнього та зовнішнього повітря, термічного опору покриття та теплотехнічних характеристик снігового покриву.

Література

- ДБН В.1.2-2:2006. Норми проектування. Навантаження і впливи. – К.: Мінбуд України, 2006. – 59 с.
- Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-3: General actions – Snow Loads. – Brussels: CEN, 2003. – 56 p.
- Sanpaulesi L. Snow Loads on Roofs in Europe: Research and Standartization // Snow Engineering. Recent Advances and Developments. – Balkema / Rotterdam / Brookfield. – 2000. – P. 3-9
- Engeset R.V., Soryeberg H.K., Udnes H.S. Snow Pillows: Use and Verification // Snow Engineering. Recent Advances and Developments. – Balkema / Rotterdam / Brookfield. – 2000. – P. 45-52.
- Stephan, Ann. Phys. U. Chem. (Wiedemann) (N.F.) 42, 269-286 (1891).
- Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел. Пер. с англ. под ред. А.А. Померанцева / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964.
- Лыков А. В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
- Строй А.Ф. Управление тепловым режимом зданий и сооружений / А.Ф. Строй. – К.: Вища шк., 1993. – 155 с.
- Канторович Л.В. Методы приближенного решения уравнений в частных производных / Л.В. Канторович, В.И. Крылов. – Л., М.: ОНТИ НКТИ СССР, 1936. – 528 с.
- Мачинский В.Д. Теплотехнические основы строительства / В.Д. Мачинский. – М.: Гос. издат. стр.-ит. литер., 1949. – 326 с.
- Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 424 с.
- Численные методы анализа / Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова. – М.: Физматгиз, 1963. – 400 с.
- Кутний Б.А. Аналіз особливостей розрахунку нестационарних теплових режимів огорожувальних конструкцій / Б.А. Кутний // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2008. – Вип. 21. – С. 106–111.
- Молька І.В. Методика експериментальних досліджень інтенсивності танення снігу на покриттях різних типів / І. В. Молька // Зб. наук. пр. ПНТУ ім. Ю. Кондратюка: Галузеве машинобудування, будівництво. – Вип. 20. – Полтава: ПНТУ, 2007. – С. 101-106.

Молька Ірина Віталіївна – асистент кафедри гідравліки, водопостачання і водовідведення, аспірантка кафедри технології будівельних матеріалів, виробів і конструкцій Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: навантаження і дії на будівельні конструкції; процеси тепло- і масообміну.

Кутний Богдан Андрійович – к.т.н., доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляція Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: теплотехніка, технічна термодинаміка.

Молька Ірина Витальевна – ассистент кафедры гидравлики, водоснабжения и водоотведения, аспирантка кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Научные интересы: нагрузки и воздействия на строительные конструкции; процессы тепло- и массообмена.

Кутный Богдан Андреевич – к.т.н., доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Научные интересы: теплотехника, техническая термодинамика.

Mol'ka Irene Vital'evna an assistant of the “Hydraulics, Water-supply and Water disposal” Chair, post graduate student of the “Technology of Building Materials, Wares and Constructions” of Chair Poltava National Engineering University after Yuriy Kondratyuk. Scientific interests: loadings and influence on building constructions; processes of thermagas supply and ventilation.

Kutnyy Bogdan Andreevich – candidate of engineering sciences, assistant professor of the “Thermogas supply and Ventilations” of Chair Poltava National Engineering University after Yuriy Kondratyuk. Scientific interests: heating engineering, technical thermodynamics.