

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СНІГОВОГО ПОКРИВУ

Розглядаються основні фізичні властивості снігу, їх особливості та застосування при інженерних розрахунках покриття зі сніговим покривом.

Ключові слова: теплопровідність, температуропровідність, густина, водонепроникність, теплоємність, альbedo, покриття, сніговий покрив.

Рассмотрены основные физические свойства снега, их особенности и применение при теплотехнических расчетах кровли со снежным покровом.

Ключевые слова: теплопроводность, температуропроводность, плотность, водонепроницаемость, теплоемкость, альbedo, покрытие, снежный покров.

Basic physical properties of snow, their features and application at the heating engineering calculations of roof with a snow-cover are considered.

Keywords: heat conductivity, thermal diffusivity, density, permeability to water, heat capacity, albedo (reflectance), roof, snow-cover.

Постановка проблеми. Сніг є найпоширенішим видом твердих атмосферних опадів. Окрема сніжинка має масу близько 1 мг. Однак маса всієї «пухової ковдри», яку разом створюють падаючі міриади сніжинок, виявляється чималою. Відкладаючись на покрівлях, вони можуть створювати значні навантаження, які необхідно враховувати при розрахунках [1, 2]. Тому доцільно детальніше вивчити природу такого явища, як снігопад, властивості снігу та фактори, що впливають на них.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання коректного врахування основних фізичних властивостей снігу при виконанні інженерних розрахунків у вітчизняній науковій літературі висвітлене недостатньо. Часто зустрічаються спрощення, за якими властивості снігу прирівнюються до властивостей льоду, що не є цілком правомірним. Відомі роботи [4, 7, 8, 10], які певною мірою розкривають особливості снігового покриву та характер процесів, що можуть відбуватися при його таненні. Цікавою є робота [5], де наведені залежності для визначення основних властивостей снігу.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. У підручниках із теплофізики [3] можна знайти дані про густину та теплопровідність снігу в трьох станах: 1) пухкий сніг; 2) ущільнений сніг; 3) сніг на початку танення. Відповідні характеристики для проміжних станів залишаються не визначеними. Крім того, є розбіжності в значеннях, які пропонуються різними авторами [3, 4, 5, 8, 11]. Особливої уваги заслуговують процеси теплообміну, танення й випаровування, що можуть відбуватися в сніговій товщі, та їх вплив на характеристики снігу.

Формулювання цілей статті. Метою даної публікації є систематизація й порівняльний аналіз даних про властивості снігу, опубліковані в різноманітних джерелах [3, 4, 5, 6, 7, 8, 11].

Виклад основного матеріалу. Одна з найдивовижніших властивостей снігу – різноманітність і неповторність форм сніжинок. Як відомо, не існує двох сніжинок однакової форми. Проте вони мають ряд спільних ознак, за якими в 1954 році Комісією снігу та льоду Міжнародної асоціації наукової гідрології була розроблена Міжнародна класифікація снігу (рис. 1) [4].



Рис. 1 – Класи сніжинок за Міжнародною класифікацією снігу

Кожний клас у свою чергу поділяється на підвиди. При цьому, розглядаючи форми зерен снігового покриву, необхідно брати до уваги процеси переносу маси та тепла, а також молекулярної перекристалізації, які створюють на порядок більше форм, ніж передбачено класифікацією атмосферних сніжинок. За певних умов падаючі сніжинки зчеплюються між собою, утворюючи великі снігові пластівці, котрі можуть досягати 10 мм у діаметрі [6]. Ученим удалося навіть дослідити зони утворення сніжинок різних форм залежно від температури та відносної вологості повітря, результатом чого є відома діаграма професора Хоккайдського університету У. Накайя, наведена на рис. 2 [4]. Теоретичне обґрунтування цієї діаграми поки що відсутнє.

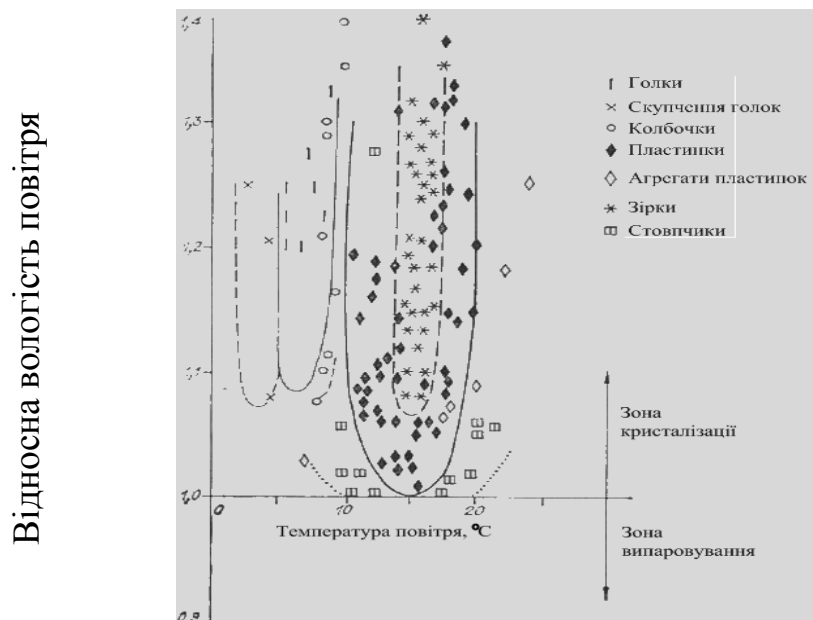


Рис. 2 – Зони утворення сніжинок різноманітних форм

Отже, склад снігового покриву доволі різноманітний. До того ж він має пошарову будову, обумовлену рядом причин: почерговими снігопадами, власною масою сніжинок, сублімацією снігових кристалів, дією атмосферних факторів (сонячної радіації, вітру, інших атмосферних опадів і т.д.). Таким чином, усі фізико-механічні властивості снігового покриву безперервно змінюються. Сухий сніговий покрив є двофазною, а мокрий – трифазною системою, що складається з кристалів льоду, води та повітря, насиченого водяними парами. Дослідження ускладнюються близькістю снігу до потрійної точки, коли вода одночасно перебуває в трьох агрегатних станах. Діаграма фазових станів подана на рис. 3 [4].

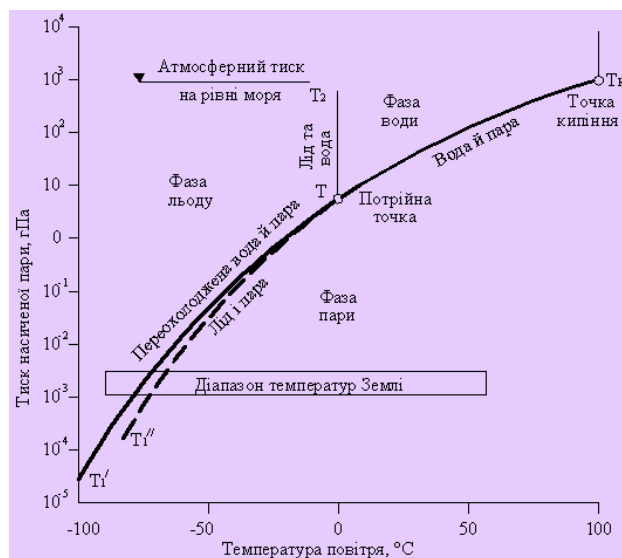


Рис. 3 – Діаграма фазових станів атмосферної води

Як видно з діаграми, при тиску насиченої пари 6,1 мбар, температурі 0°C та загальному атмосферному тиску 1013 мбар однакова ймовірність існування всіх трьох фаз води. Це точка глибоких якісних метаморфоз. Наближаючись до неї, вода в будь-якій фазі починає «готуватися» до

перетворень тим активніше, чим ближче потрійна точка. Перехід через криву TT_1 цікавий тим, що при температурах, нижчих ніж $0\text{ }^\circ\text{C}$, фазові переходи між парою та льодом відбуваються без рідкої фази, оскільки переохолоджена вода рідко зустрічається в природі. Так в атмосфері відбувається кристалізація й випаровування снігу.

Для вивчення снігу використовуються такі розділи фізики, як механіка суцільних багатокомпонентних середовищ, статистична фізика, аерогідромеханіка, теплофізика, електродинаміка. У теоретичному снігознавстві, як і в гляціології, широко застосовується тензорне числення.

Кристалізація пари в поровому просторі «снігової ковдри» та на перетині сніжинок, на більш крупних сніжинках за рахунок випаровування дрібних та подальші стадії метаморфізму снігу досі детально не вивчені. Відомо, що із часом будь-який сніговий покрив повністю змінює свою структуру, стаючи більш крупнозернистим. Радикально змінюється й форма зерен, що підтверджується дослідженнями автора, методика проведення яких описана в роботі [9].

За рахунок надзвичайної різноманітності видів сніжинок, структур снігового покриву та можливих якісних перетворень густина снігу є вкрай мінливою. За даними натурних спостережень її значення можуть коливатися від 10 до 700 кг/м^3 [4]. При цьому верхня межа відповідає стану снігу, коли його ще можна називати снігом. При подальшому збільшенні густини він перетворюється на лід, який кардинально відрізняється від свого попередника. Дослідження [5] показують, що в більшості випадків густина снігу змінюється від 180 до 350 кг/м^3 на початку танення, у середині танення від 350 до 450 кг/м^3 , наприкінці танення доходить до 600 кг/м^3 . Розрахункові формули для визначення густини снігу базуються на узагальненні емпіричних даних. Однією з перших вдалих є формула Абе

$$\rho = a \cdot 10^{bz}, \quad (1)$$

де $a = 185,4$; $b = 0,545$; z – глибина від поверхні снігу.

При визначенні теплотехнічних характеристик снігу на покриттях необхідно враховувати, що із часом нижні шари снігу будуть ставати більш рихлими, а верхні – ущільнюватися. Це пов'язано з переміщенням водяної пари від більш нагрітих нижніх шарів у верхні під дією різниці парціальних тисків [10]. У результаті на поверхні утворюється кірка – наст.

Водопроникність снігового покриву для гравітаційної води, що надходить від дощу або танення верхнього шару снігу, залежить від кількості, розмірів та форми пор у сніговому покриві, наявності льодових прошарків тощо. Характеристикою водопроникності є коефіцієнт фільтрації, який може коливатися від $1 \cdot 10^{-3}$ до $6 \cdot 10^{-3}\text{ м/с}$ [5].

Визначення теплових характеристик снігу пов'язане із значними труднощами через описану раніше складність будови снігового покриву. Їх можна отримати експериментально в лабораторіях або в польових умовах.

Для різних станів снігу в довідковій літературі можна знайти значення теплопровідності. Зіставлення даних різних авторів подано в таблиці 1.

Таблиця 1 – Теплопровідність снігу залежно від його густини

Дюнін [4]		Фокін [3]		Краснощоків [11]	
ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)
100	0,0293	200	0,09	200	0,1
250	0,176	350	0,3	400	0,46
500	0,712	500	0,55		

Для теоретичного розрахунку коефіцієнтів теплопровідності λ та температуропровідності a Г.П. Абельсом у 1893 р. були запропоновані залежності [5]:

$$\lambda = 2,85 \cdot 10^{-6} \rho^2; \quad (4)$$

$$a = 4,85 \cdot 10^{-6} \rho, \quad (5)$$

де ρ – густина снігу.

Формули Абельса дають задовільні результати при $\rho < 350$ кг/м³. Для $\rho > 350$ кг/м³ ці коефіцієнти були визначені А.С. Кондратьєвою:

$$\lambda = 3,56 \cdot 10^{-6} \rho^2; \quad (6)$$

$$a = 6,05 \cdot 10^{-6} \rho. \quad (7)$$

При цьому для розрахунку a прийнято значення питомої теплоємності $c = 2,12$ кДж/(кг·°С), характерної для льоду при 0°С, а одиниця вимірювання теплопровідності – м²/год.

За даними роботи [8] формули для визначення коефіцієнтів тепло- та температуропровідності аналогічні формулам (4) і (5).

Порівняльний аналіз даних, одержаних за формулами (4) та (6), наведеними в праці [5], та даних робіт [3, 4, 11] подано на рис. 4.

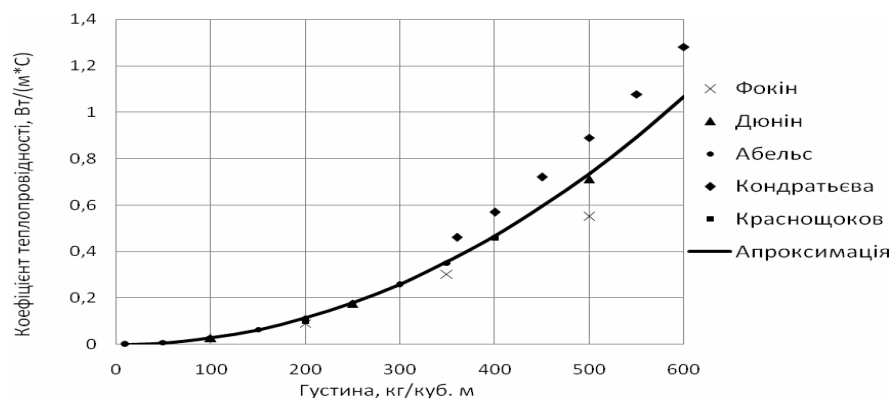


Рис. 4 – Залежність коефіцієнта теплопровідності снігу від густини

Дані рисунка 4 задовільно апроксимуються виразом

$$\lambda = 2,4 \cdot 10^{-6} \rho^{2,033}. \quad (8)$$

Відомо, що питома теплоємність снігу залежить від температури й може бути визначена за формулою Вейнберга [5]

$$c = 2,12 \cdot (1 + 0,0037 \cdot t). \quad (9)$$

Для оцінювання впливу зміни температури на теплоємність снігу за формулою (8) побудовано графік, зображений на рис. 5.

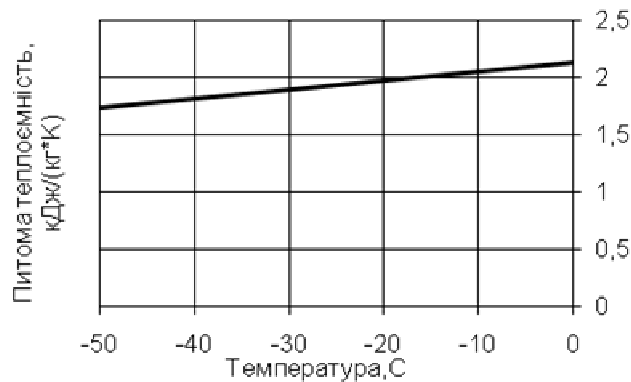


Рис. 5 – Залежність питомої теплоємності снігу від температури

Як видно з рис. 5, в інтервалі найхарактерніших температур від -20 до 0 °С зміна теплоємності незначна, тому в розрахунках із достатньою точністю можна користуватися осередненим значенням теплоємності.

Виходячи із цього, у теплотехнічних розрахунках коефіцієнт температуропровідності доцільно визначати за відомою формулою

$$a = \lambda / (c\rho) \quad (10)$$

Це дає змогу врахувати вплив температури на теплоємність снігу та застосувати узагальнюючу формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності, одержану з рис. 4,

$$\lambda = 2,4 \cdot 10^{-6} \rho^{2,033} \quad (11)$$

Отже, основні властивості снігу можна знаходити за таблицею 2.

Таблиця 2 – Основні фізичні властивості снігу

Фізичні властивості	Формули для визначення
Густина	$\rho = 185,4 \cdot 10^{0,545z}$
Коефіцієнт теплопровідності	$\lambda = 2,4 \cdot 10^{-6} \rho^{2,033}$
Коефіцієнт температуропровідності	$a = \lambda / (c\rho)$
Теплоємність	$c = 2,12 \cdot (1 + 0,0037 \cdot t)$

Досить своєрідними є особливості теплообміну снігу з навколишнім середовищем, який відбувається у формі променевої енергії. Сніг поглинає та відбиває сонячні промені, тобто пряму й розсіяну сонячну радіацію, що складає сумарну сонячну радіацію. Повний тепловий потік, який випромінюється, може бути знайдений за законом Стефана – Больцмана

$$Q_T = \sigma_T \cdot b_T \cdot T^4, \quad (12)$$

де T – абсолютна температура тіла; σ_T – стала випромінювання абсолютно чорного тіла (тіла, здатного поглинати будь-яку радіацію, що падає на його поверхню); b_T – коефіцієнт відносної випромінювальної здатності (характеризує відхилення випромінювальної здатності даної

поверхні від властивостей абсолютно чорного тіла (АЧТ), для якого $\sigma_T = 1$). За експериментальними даними [4] встановлено, що для свіжого снігу $\sigma_T = 0,985 - 0,995$, для ущільненого крупнозернистого $\sigma_T = 0,97 - 0,98$. Тобто з позицій термодинаміки випромінювання сніг є найбільш «чорним» порівняно з іншими природними утвореннями на поверхні Землі.

За даними П.П. Кузьміна [4], сухий зимовий покрив є практично непроникним для сонячних променів, а мокрий весняний сніг є непроникним при товщині 10 – 30 см. Це ж підтверджується даними, поданими в роботі [7]. При цьому коефіцієнт відбивання сонячної радіації (альbedo) снігу досить великий. Він залежить від структури та міри забрудненості снігу. Для щільного чистого снігу його значення коливаються від 0,85 до 0,95 (тобто майже вся сонячна енергія відбивається снігом), для мокрого – 0,5 [8]. Властивістю снігового покриву відбивати значну частину сонячної радіації пояснюється, чому в ясні сонячні зимові періоди сніговий покрив зберігається, а температура повітря залишається низькою.

Таким чином, енергією сонця в тепловому балансі покрівлі можна умовно нехтувати.

Висновки. Узагальнення наявних даних дозволило надати рекомендації щодо визначення основних фізичних властивостей снігу, які можуть бути застосовані в інженерних розрахунках, у тому числі в теплотехнічних розрахунках покриттів зі сніговим покривом.

Література

1. Пашинський В.А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції для території України / В.А. Пашинський. – К., 1999. – 185 с.
2. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, М.А. Микитаренко, В.А. Пашинский, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин; под ред. д.т.н. А.В. Перельмутера. – К.: Сталь, 2005. – 500 с.
3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания / К.Ф. Фокин. изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
4. Дюнин А.К. В царстве снега / А.К. Дюнин. – Новосибирск: Наука, 1983. – 90 с.
5. Козлов Д.В. Основы гидрофизики: Учебное пособие / Д.В. Козлов. – М.: МГУП, 2004. – 242 с.
6. Тарасов Л.В. Физика в природе: кн. для учащихся / Л.В. Тарасов. – М.: Просвещение, 1988. – 351 с., ил.
7. Виссмен мл. У. Введение в гидрологию / У. Виссмен мл., Т.И. Харбаф, Д.У. Кнэпп / пер. с англ. под ред. А.Ф. Бефани. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. – 470 с.
8. Чеботарев А.И. Общая гидрология / А.И. Чеботарев. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. – 543 с.
9. Молька І.В. Методика експериментальних досліджень інтенсивності танення снігу на покриттях різних типів / І.В. Молька // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2007. – Вип. 20. – С. 101 – 106.
10. Франчук А.У. Теплотехнический расчет покрытий со снеговым покровом / А.У. Франчук // Исследования по строительной теплофизике: сб. статей под ред. к.т.н. Б.Ф. Васильева. – М., 1959. – С. 287 – 295.
11. Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: «Энергия», 1979. – 287 с.

Надійшла до редакції 15.06.2009

© І.В. Молька