

УДК 624.042.4

## **Імовірнісна модель накопичення снігу в місцях перепадів висот будівель**

**Пічугін С.Ф., д.т.н., Дрижирук Ю.В.**

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,  
Україна

**Анотація.** В статті наводяться результати комплексного підходу до вивчення формування снігового навантаження на покрівлях будівель. Запропонована імовірнісна модель накопичення снігу в місцях перепадів висот.

**Аннотация.** В статье приводятся результаты комплексного подхода к изучению формирования снеговой нагрузки на кровлях зданий. Предложена вероятностная модель накопления снега в местах перепадов высот.

**Abstract.** The article gives results of the complex approach to studying of formation of snow load on roofs of buildings. The probabilistic model of accumulation snow in places of differences of heights is offered.

**Ключові слова:** снігове навантаження, вітрове навантаження, імовірнісна модель, випадкова величина, випадковий процес.

**Постановка проблеми.** Методи імовірнісного розрахунку будівельних конструкцій набувають все ширшого поширення в інженерній практиці, адже з їх допомогою вдається не тільки забезпечити необхідний рівень надійності конструкцій, а і домогтися значної економії матеріалів. Відомо, що атмосферні навантаження, зокрема снігове та вітрове, є досить мінливими та мають імовірнісний опис. Результатом спільної дії цих навантажень є надмірне скупчення снігу в місцях перепадів висот будівель, що також є випадковою величиною та потребує детальних досліджень.

**Аналіз останніх досліджень.** Формування снігового навантаження на покрівлях будівель широко досліджувалося в ЦНДІБК ім. Кучеренка під керівництвом В.А. Отставнова [11], Н.К. Жуковою та авторами монографії [13]. Експериментальні дослідження сніговідкладень в останній час проводили І.В. Лебедева та І.В. Некрасов [9], значний внесок у розвиток імовірнісних моделей снігового та вітрового навантажень зробили В.А. Пашинський [3] та С.Ф. Пічугін [5].

**Виділення невирішених частин загальної проблеми.** На даний час оцінка надійності будівельних конструкцій під дією атмосферних навантажень проводиться на основі їх імовірнісних моделей, але параметри «снігових мішків» все ще визначаються детерміністично. Тому виникає необхідність розроблення імовірнісної моделі накопичення снігу в місцях

перепадів висот.

**Формулювання цілей статті.** Метою даної статті є дослідження випадкового процесу формування надлишкового снігового навантаження в місцях перепадів висот будівель.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження снігового навантаження на будівельні конструкції є актуальним у наш час. Досить наглядно це підтвердила зима 2009-2010 років, що виявилася найбільш сніжною за останні 25 років. Наслідком значної кількості твердих опадів стали численні аварії будівель і споруд, зокрема, на півдні України (рис. 1). Значних ушкоджень зазнали легкі конструкції покриттів, що проектувалися на занижене снігове навантаження за СНиП [2].

За результатами снігомірних спостережень (снігозйомок), проведеними авторами в м. Полтаві, цієї зими висота снігового покриву на поверхні землі становила 35-40 см, тоді як на дахах цей показник змінювався від 20 см до 1,2 м у районі перепадів висот. Таким чином, навантаження від снігу варіювалося від 360 до 2160 Па, що перевищувало значення, рекомендовані нормами СНиП. Проте виникає питання оцінки надійності конструкцій покриттів покрівель, запроектованих згідно з попередніми редакціями норм (особливо старі будівлі) та більш точне врахування при проектуванні надлишкового навантаження від снігу в місцях перепадів висот будівель.



Рис. 1. Деформації конструкцій покриття під дією снігового навантаження

Був застосований комплексний підхід до вирішення даної проблеми, який полягає в дослідженні еволюції вітчизняних будівельних норм з навантаження, порівнянні українських ДБН з закордонними аналогами, натурних дослідженнях снігового навантаження та імовірнісному аналізу утворення надлишкових скупчень снігу в місцях перепадів висот будівель.

Простежено шлях розвитку радянських норм СНиП від 1933 р. до 1985 р. Важливим є те, що більшість напрацювань цих документів практично без змін запозичені розробниками ДБН В.1.2.-2:2006 «Навантаження і впливи» і проекту російського СНиП «Нагрузки и воздействия» 2007 року та гармонізовані з нормами Європи [6]. Цікавим також є той факт, що в 50-х роках минулого століття напрацюваннями радянських науковців в області снігового навантаження активно цікавились канадські вчені, обгрунтовуючи це подібністю кліматичних умов. Очевидно, дані праці були взяті за основу національних будівельних нормативів Канади.

Для проведення порівняльного аналізу українських ДБН із закордонними аналогами Єврокод 1 та американським ASCE 7-05 були підібрані 48 випадків будівель, що поділялися відповідно до величини перепадів висот (табл. 1). Дахи будівель приймалися холодними та плоскими (ухил менше 15°). Це обгрунтовується значною поширеністю даних інженерних рішень та пропорційним ростом вантажних площ епюр надлишкового навантаження зі збільшенням ухилу [8].

Таблиця 1

**Вихідні дані для порівняльного розрахунку**

Випадок	$l_1, м$	$l_2, м$	$h_1, м$	$h_2, м$	$h_3, м$	$h_4, м$
1	2	2	2	3	5	9
2	30	30				
3	60	80				
4	20	120				
5	120	120				
$l_1$ – довжина верхньої покрівлі; $l_2$ – довжина нижньої покрівлі; $h_i$ – перепад висоти.						

Довжини покрівель підбиралися за наступним принципом – невеликі (2 м – 30 м), середні (50 м – 70 м) і значні (80 м – 120 м) та компонувалися між собою. Крім того, деякі комбінації після попереднього розрахунку були відкинуті як такі, що не несуть корисної інформації (перепад висоти  $h_2$ ). Характеристичне значення снігового навантаження на поверхні землі у всіх випадках приймалося для м. Полтави і становило  $s_0 = 1,45$  кПа. Решта параметрів розраховувалися за рекомендаціями відповідних норм.

Опустивши розрахунки, покажемо основні параметри епюр надмірного снігового навантаження біля перепадів висот будівель. Оскільки отримана значна кількість даних, наводимо лише найбільш характерні результати, на основі яких можна зробити висновки про взаємовідповідність норм різних країн (рис. 2). Порівняльну оцінку снігових мішків найбільш наглядно виконувати за вантажними площами епюр снігового навантаження.

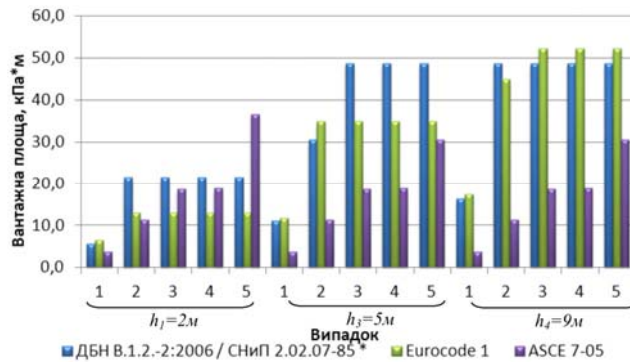


Рис. 2. Порівняння вантажних площ снігового навантаження за нормами різних країн

Як видно з рис. 2, результати порівняння вказують на те, що вітчизняні норми у більшості випадків дають високі значення снігового навантаження, тим самим підвищуючи рівень надійності запроєктованих конструкцій. В той же час за нормами Єврокод-1 [14] результати відрізнялись як в меншу, так і в більшу сторону (до 20 %). Що стосується ASCE [15], дані норми, судячи з усього, забезпечують найвищу точність розрахунку, суттєво занижуючи запас снігового навантаження. Крім того, вони відрізняються складністю формул і великою кількістю параметрів, що вимагає від інженера більших затрат праці.

Для визначення фактичного розподілу снігу в місцях перепадів висот будівель були виконані натурні снігомірні спостереження – снігозйомки. Зазвичай вони застосовується в метеорологічній науці, проводяться на поверхні землі відповідно до розробленого маршруту. Метою снігозйомок є вивчення динаміки висоти та щільності снігового покриву, за цими даними визначається також водність снігу. Спостереження за накопиченням снігу на покрівлях будівель і споруд мають важливе значення для визначення надлишкового снігового навантаження та запобігання перевантаженню несучих конструкцій дахів.

Впродовж зимових періодів 2008-2009 рр. та 2009-2010 рр. була проведена снігозйомка на покрівлях корпусів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, при цьому обирались ділянки з перепадами висот. Снігомірна зйомка проводилась за загальноприйнятою методикою [4, 12]. Висота снігового покриву вимірювалась за допомогою снігомірної рейки з кроком 0,5 м, для визначення щільності снігу використовувався снігомір ваговий ВС-43 (рис. 3). Виконувалося 10 замірів щільності снігу, на основі яких визначалась середня щільність, яка становила 0,10...0,28 г/см<sup>3</sup> в залежності від виду снігу.



Рис. 3. Виконання снігозйомок

Результатами снігозйомок були фактичні параметри «снігових мішків» (рис. 4), які далі порівнювались з розрахунковими. В деяких випадках взагалі не спостерігалось утворення надлишкового навантаження, натомість внаслідок підвищених тепловиділень покрівель відбувалося підтавання снігу, що підтверджували численні бурульки в районах розжолобоків та льодяна кірка під снігом. Як наслідок, виникає питання про врахування в розрахунках фактичного режиму експлуатації покрівлі, адже в Україні значна кількість дахів має підвищені тепловиділення через застосування неефективних утеплювачів або виведення на технічні поверхи вентиляційних каналів. Вартим подальших досліджень, на думку авторів, є проектування теплих покрівель, що дозволило б звести до мінімуму надлишкове снігове навантаження. Досить важливими є наслідки впливу мінливості погодних умов на сніговий покрив покрівель. Під впливом чергування відлиг, замерзань, дощових та снігових опадів на покрівлі неопалюваної будівлі зафіксовано до 10 см криги.



Рис. 4. «Сніговий мішок» у районі перепаду висот

Досить інформативним виявилось зіставлення теоретичних результатів за ДБН та Єврокодом 1 з фактичними даними снігозйомок [7]. Встановлено, що для перепаду висот 1,66 м, довжини верхнього та нижнього покриттів відповідно 3 м і 12 м (рис. 5, а) та перепаду висот 1,7 м, довжини верхнього та нижнього покриттів відповідно 4,8 м і 6,8 м (рис. 5, б). В цьому випадку найбільш точно фактичний розподіл снігових відкладень описували європейські будівельні норми, вітчизняні ж значно занижують рівень навантаження в зоні, з якої відбувається здування снігу. Так, за ДБН вважається, що до місця утворення «снігового мішка» переноситься до 80 % снігу при фактично встановлених 20 % – 50 %.

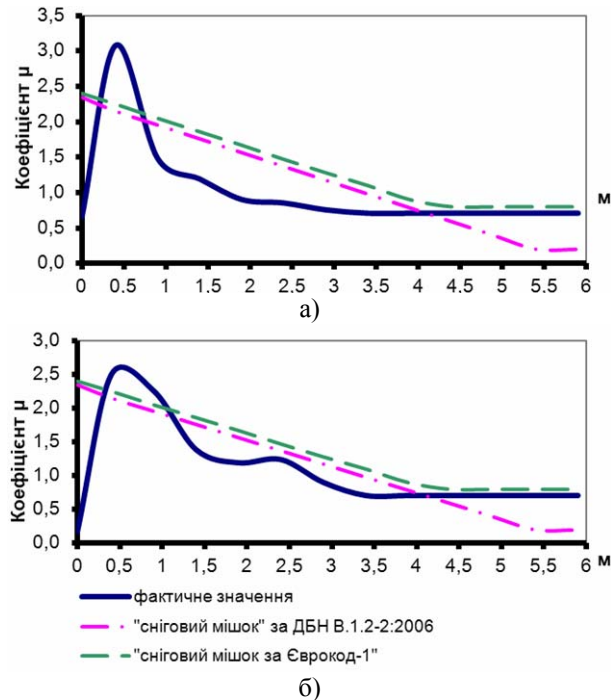


Рис. 5. Епюри снігового навантаження біля перепаду висот:  
 а – перепад висоти 1,66 м, довжина в.п. - 3 м, н.п – 12 м,  
 б – перепад висоти 1,7 м, довжина в.п. – 4,8 м, н.п – 6,8 м

Отримані результати натурних спостережень та порівняльних розрахунків мають важливе значення для створення імовірнісної моделі підвищеного скупчення снігу в місцях перепадів висот будівель. Так, пропонується за основу прийняти механізм формування «снігового мішка», заснований розробниками норм СНиП, але з деякими поправками. «Сніговий мішок» (рис. 6) залежить від перепаду висот  $h$  та прогонів верхнього й нижнього покриттів  $l_1$  і  $l_2$ . Також важливу роль відіграють коефіцієнти  $m_1$  і  $m_2$ , котрі

відповідають часткам снігу, що зноситься з верхнього та нижнього покриттів до місця перепаду висот та залежать від ухилу покрівлі. На основі цих параметрів розраховується коефіцієнт  $\mu$  переходу від снігового навантаження на поверхні землі до навантаження на покритті

$$\mu = 1 + \frac{1}{h}(m_1 l_1 + m_2 l_2), \quad (1)$$

Довжина зони підвищеного снігонакопичення  $b$  приймається рівною  $2h$ . Норми пропонують збільшувати цю зону при малих перепадах висот за рахунок перерозподілу снігу. Проте цей прийом є штучним, тоді як значення  $2h$  доведене дослідним шляхом та регламентується також нормами Єврокод-1. Таким чином, «сніговий мішок» представляє собою трапецію з основами  $\mu$  та  $\mu_1$  і висотою  $b=2h$ , а рівнодійна від підвищеного снігового навантаження в районі перепаду становитиме:

$$M = \frac{\mu + \mu_1}{2} 2h S_0, \quad (2)$$

де  $S_0$  – снігове навантаження на поверхні землі.

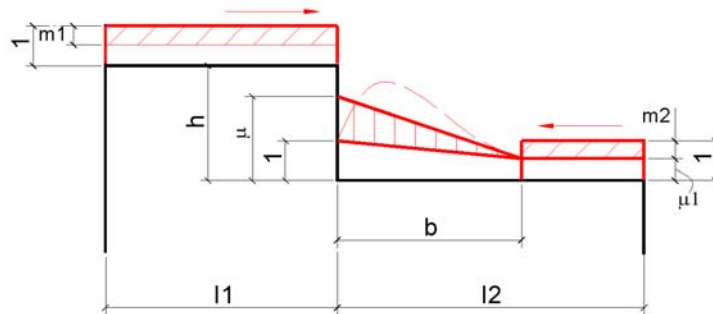


Рис. 6. Схема формування «снігового мішка» за нормами СНиП/ДБН

Коефіцієнти  $\mu$  та  $\mu_1$  залежать від значень показників  $m_1$  і  $m_2$ , що відображають знесення снігу вітром з верхньої та нижньої покрівлі та повинні носити випадковий характер. Відомо, що існує два види знесення снігу – під час заметілей вітрами зі швидкістю, більшою 4 м/с та в період між заметілями вітрами зі швидкістю, що перевищує 6,5 м/с. Якщо перший вид має місце завжди, то для другого важливою умовою є наявність стійкого снігового покриву. Тому замість  $m_1$  та  $m_2$  доцільно ввести формулу знесення снігу вітром, запропоновану В.А. Отставновим [11]:

$$m_1 = m_2 = (0,15v - 0,39)W + qW_2\tau, \quad (3)$$

де  $v$  – середнє з усіх зареєстрованих протягом зими швидкостей вітру, починаючи з 4 м/с та більших;  $W$  – повторюваність цих вітрів, отримана обробкою авторами метеоданих;  $q$  – середня інтенсивність зносу без снігопадів;  $W_2$  – повторюваність вітрів зі швидкостями 6,5 м/с та вище;  $\tau$  – період без заметілей.

Проте, як показали натурні спостереження та розрахунки, знесенням у період між снігопадами можна знехтувати, оскільки часті відлиги та опади у вигляді дощу роблять його практично неможливим. Розрахункове значення кількості знесеного снігу становить 2,43 Па. Таким чином з формул (2) та (3), виконавши деякі спрощення, перейдемо до імовірнісного запису:

$$\tilde{M} = 2h\tilde{S}_0(2 + 0,15p\tilde{v}W - 0,39pW), \quad (4)$$

де  $p = \frac{l_1 + l_2}{2h} - 1$  – складова, що залежить від довжин покрівель та розміру перепаду висот.

Таким чином, вага знесеного до перепаду снігу залежить від кількості твердих опадів на поверхні землі  $\tilde{S}_0$  та швидкості вітру  $\tilde{v}$ . Вітер у даному випадку сприяє переміщенню снігу, тому є формоутворювальним фактором. Оскільки,  $\tilde{S}_0$  та  $\tilde{v}$  є випадковими величинами, то вага «снігового мішка» по суті є добутком двох незалежних випадкових величин.

Рішення даної задачі в загальному вигляді має вид:

$$M(z) = \int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{s} f\left(s, \frac{z}{s}\right) ds. \quad (5)$$

Відомо, що вітрове та снігове навантаження мають імовірнісний опис. Розподіли снігового [5] та вітрового [10] навантажень приймаються поліномо-експоненційними. Таким чином, після перетворень (5) набуде виду:

$$M(z) = \int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{s} \exp\left(C_0 + C_1 2hs + C_2 (2hs)^2 + C_3 (2hs)^3 + a_0 + a_1 \frac{z}{2hs} + a_2 \left(\frac{z}{2hs}\right)^2 + a_3 \left(\frac{z}{2hs}\right)^3\right) ds, \quad (6)$$

де  $C_0 \dots C_3, a_0 \dots a_3$  – коефіцієнти поліномів розподілів снігового та вітрового навантажень.



Чисельне інтегрування (6) дозволить отримати закон розподілу ваги «снігового мішка», що в нормованому вигляді є наступним (рис. 7).

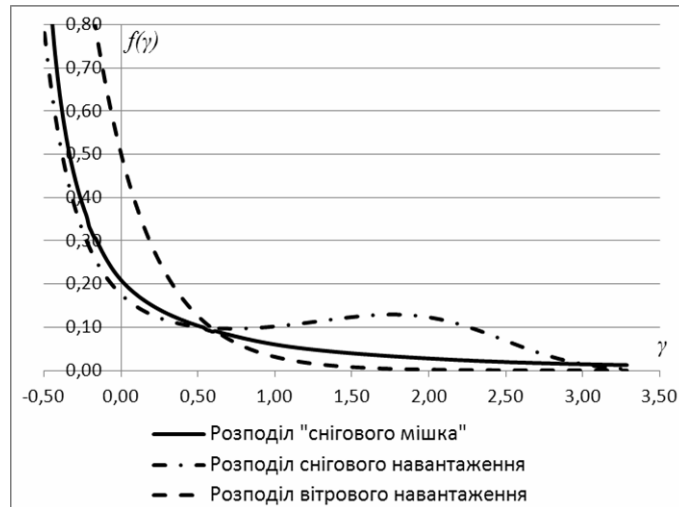


Рис. 7. Розподіл снігового і вітрового навантажень та «снігового мішка»

Як видно з рис. 7, отримана крива проходить між кривими розподілів снігового та вітрового навантажень, має плавний характер та прямує до логнормального закону. До точки перетину кривих окремих навантажень крива розподілу «снігових мішків» аналогічна кривій снігового навантаження, далі її характер більш схожий з кривою розподілу вітрового навантаження.

Маючи закон розподілу, можливо отримати його характеристики та інтегральну функцію, а також понижувальні коефіцієнти для «снігових мішків».

### Висновки

Комплексний підхід до вивчення снігового навантаження дозволив отримати ряд результатів. Встановлено, що вітчизняні ДБН забезпечують найвищий рівень снігового навантаження, результати за Єврокод-1 відрізняються на 20 % в більшу або меншу сторону, а американський аналог суттєво його занижує. Однак саме Єврокод найбільш точно описує фактичний розподіл снігу на покрівлях. Крім того, вдалося вперше отримати імовірнісну модель надлишкових сніговідкладень у місцях перепадів висот будівель. Ця модель дозволить більш точно визначати снігове навантаження в місцях перепадів висот, оцінювати надійність покрівель під дією «снігових мішків» та сприятиме подальшій гармонізації вітчизняних норм щодо навантажень з європейськими.

## **Література**

- [1] ДБН В.1.2.-2-2006 Навантаження і впливи. Норми проектування. – К.: 2006. – 60 с.
- [2] СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 36 с.
- [3] Пашинський В.А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції для території України. – К., 1999. – 185 с.
- [4] Копанев И.Д. Методы изучения снежного покрова – Л.: Гидрометеоздат, 1971. – 226 с.
- [5] Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: [Текст] монография. – Полтава: ООО «АСМИ», 2009. – 452 с.
- [6] Пичугін С.Ф., Дрижирук Ю.В. Аналіз розвитку норм проектування по сніговому навантаженню // Збір. наук. пр. УкрНДІпроектстальконструкцій ім. В.М. Шимановського. – Вип.1. – К: Сталь, 2008. – С. 5 – 15.
- [7] Пичугін С.Ф., Дрижирук Ю.В. Натурні дослідження снігового навантаження на покрівлях з перепадами висот // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. – Вип. 19. – Рівне: ПП Баришев К.В., 2009. – С. 290 – 297.
- [8] Пичугін С.Ф., Дрижирук Ю.В. Порівняльний аналіз розрахункових схем снігового навантаження біля перепадів висот будівель за нормами різних країн // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збір. наук. пр. – Вип. 18. – Рівне: ПП Баришев К.В., 2009. – С. 406 – 413.
- [9] Лебедева И.В., Некрасов И.В., Мяснянкин С.Ю. Экспериментальные исследования снегоотложений // Строительная механика и расчет сооружений. – 2007. – № 2. – С. 76 – 85.
- [10] Харченко Ю.А. Оценка параметров надежности стальных сжато-изогнутых элементов постоянного сечения: Автореф. дис... канд. техн. наук / ПДТУ. – Полтава, 1994. – 20 с.
- [11] Отставнов В.А., Розенберг Л.С. Возможности снижения снеговых нагрузок на плоские покрытия // Промышленное строительство. – 1966. – № 12 – С. 28 – 32.
- [12] Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, В.А. Пашинский, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин; Под общей ред. А.В. Перельмутера. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 482 с.
- [13] Снеговые нагрузки на покрытия зданий в условиях Севера (на примере Якутии / В.В. Филиппов, А.Т. Копылов, Т.А. Корнилов и др – М.: Наука, 2000. – 246 с.
- [14] EN 1991-1-3. Eurocode 1 – Actions on Structures. – Part 1–3: General Actions – Snow Loads. – July 2003. – 56 p.
- [15] ASCE 7-05. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. – American Society of Civil Engineers, 2005 (with commentary).

*Надійшла до редколегії 10.06.2010 р.*