

В. А. Пашинський

**АТМОСФЕРНІ НАВАНТАЖЕННЯ
НА БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ
ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ**

Київ - 1999

Наукове видання

В. А. Пашинський

**АТМОСФЕРНІ НАВАНТАЖЕННЯ
НА БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ
ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ**

Пашинський В. А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції для території України. – К., 1999. – 185 с.

Монографія присвячена проблемі статистичного дослідження та нормування навантажень на будівельні конструкції. Викладено основні питання методології та детально висвітлено отримані автором результати нормування снігового та вітрового навантажень. Розроблено карти територіального районування України за розрахунковими значеннями й основними статистичними характеристиками снігового та вітрового навантажень.

Наведені дані можуть бути безпосередньо використані при проектуванні та розрахунках надійності несучих конструкцій, а також стати основою для розроблення Державних будівельних норм України з атмосферних навантажень.

Для наукових працівників, аспірантів, інженерів-проектувальників та студентів будівельних спеціальностей.

Рекомендовано до друку Вченою Радою Полтавського державного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Рецензенти: докт. техн. наук, проф. П.Ф.Вахненко
докт. техн. наук, проф. А.В.Перельмутер
докт. техн. наук, проф. О.В.Шимановський

В С Т У П

Найбільш невизначеними величинами, які враховуються при розрахунках несучих будівельних конструкцій, є зовнішні навантаження та впливи експлуатаційного середовища, особливе місце серед яких посідають атмосферні навантаження. Велика часова та територіальна мінливість поряд із залежністю від географічних факторів викликають необхідність окремого дослідження снігового, вітрового та інших природних навантажень для кожної конкретної місцевості, регіону чи країни.

Діючі норми навантажень СНиП 2.01.07-85 [58] далеко не повною мірою враховують географічні особливості території України, що в ряді випадків приводить до тяжких наслідків. Так наприклад, в південних областях України трапляються аварії покриттів, викликані сніговими навантаженнями, які у 2 - 3 рази перевищують встановлені СНиП [58] розрахункові значення. Така невідповідність обумовлена самою методикою нормування, яка не враховує збільшених коефіцієнтів варіації снігового навантаження в малосніжних областях України.

Бажає кращого також територіальне районування, виконане в СНиП 2.01.07-85. Надмірно великі кроки градації районних значень привели до того, що уся територія України розміщується в трьох територіальних районах за значеннями снігового та вітрового навантаження. Це погіршує точність визначення розрахункових навантажень і приводить до надмірних запасів в одних конструкціях та недостатньої надійності інших.

Суттєвим недоліком діючих норм [58] є також ігнорування строку служби несучих конструкцій при їх проектуванні. Норми США, Японії та деяких європейських країн чітко регламентують періоди повторюваності розрахункових навантажень або навіть дозволяють обчислювати розрахункові значення атмосферних навантажень для необхідного періоду повторюваності. Діючі СНиП взагалі залишають невідомими період повторюваності розрахункового навантаження та імовірність його перевищення протягом строку служби конструкції.

Відмічені недоліки викликають необхідність перегляду методики та результатів нормування атмосферних навантажень для території України з метою створення національних норм навантажень на будівельні конструкції.

В розрахунках несучих конструкцій за методом граничних станів [10], [13] слід враховувати найбільші реально можливі значення навантажень. Велика статистична мінливість багатьох навантажень обумовлює необхідність застосування імовірнісних методів для встановлення їх розрахункових значень. При цьому звичайно виконуються дії, сукупність яких нижче позначається терміном "нормування навантаження":

- попередні дослідження з метою раціонального вибору імовірнісної моделі навантаження;
- збір статистичних даних шляхом проведення пасивного експерименту в експлуатаційному режимі;
- обробка наявних даних та обчислення розрахункових значень навантаження для типових умов експлуатації конструкцій;
- узагальнення отриманих результатів, у тому числі розробка карт територіального районування природних навантажень та впливів, типізація експлуатаційних режимів, встановлення загальних залежностей і т.п.;
- розробка нормативних положень, що забезпечують однозначне, максимально спрощене та досить точне визначення необхідних розрахункових значень для усіх можливих розрахункових ситуацій та режимів експлуатації конструкцій.

Останнім часом проблемі нормування навантажень на будівельні конструкції приділяється велика увага. Загальні методи нормування навантажень та урахування їх сумісної дії, різні імовірнісні моделі та методи нормування атмосферних навантажень розроблялися в дослідженнях Л.Е. Анапольської, А.Я. Барашикова, О.О. Бать, І.А. Белишева, Р.П. Бернгардта, В.В. Болотіна, Л.Б. Гарцмана, Е.В. Горохова, Г.А. Гриневича, А.Я. Дривінга, М.В. Заваріної, Р.І. Кінаша, Л.В. Клепікова, Б.М. Кошутіна, К.С. Лосицької, П.Д. Окулова, В.О. Отставнова, А.В. Перельмутера, С.Ф. Пічугіна, В.Д. Райзера, О.Р. Ржаніцина, А.С. Розенберга, М.М. Складнева, М.В. Сидоренка, М.С. Стрелецького, Ю.Д. Сухова, С.А. Тімашева, Б.Ю. Уварова, Е.І. Федорова,

В.П. Чиркова, G. Augusti, A. Baratta, F. Casciati, E. Gumbel, H.O. Madsen, J. Murzevski, G. Solari, W. Shiraki, C. J. Turkstra, Y. K. Wen, J. Wieringa, J. A. Zuranski та багатьох інших вчених.

Методологія нормування навантажень та урахування їх спільної дії на конструкції, імовірнісні моделі снігового і вітрового навантажень та конкретні методи їх нормування розглядалися також в роботах автора [23-38, 41, 46, 68], які й стали основою цієї книги. Поряд з питаннями методології, в монографії також викладені результати нормування снігового та вітрового навантаження для території України, які можуть бути використані при розробці Державних будівельних норм.

В першому розділі описані підходи до регулювання надійності несучих будівельних конструкцій методом граничних станів, а також імовірнісні моделі та методи нормування змінних навантажень. Другий, третій та четвертий розділи присвячені нормуванню снігового навантаження на поверхні землі, середньої складової вітрового навантаження, а також способам урахування сумісної дії змінних навантажень. У п'ятому розділі виконане територіальне районування основних статистичних характеристик досліджених навантажень з метою інформаційного забезпечення розрахунків надійності несучих конструкцій. Шостий розділ містить приклади застосування отриманих результатів при розрахунках сталевих конструкцій.

Метою даної книги не було систематичне викладення усіх відомих методів та результатів нормування навантажень на будівельні конструкції. Наведені результати отримані автором чи за його безпосередньою участю. Саме цим пояснюється вибір матеріалу та деяка фрагментарність бібліографії. За більш широкими відомостями необхідно звернутися до численних праць згаданих вище авторів.

Розділ 1. МЕТОДИ НОРМУВАННЯ ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1. Метод граничних станів, як засіб регулювання надійності елементів будівельних конструкцій

Застосування методу граничних станів дозволяє розділити процедуру розрахунку несучих будівельних конструкцій на два етапи: нормування розрахункових параметрів та інженерний розрахунок конструкції. На першому етапі, виходячи з заданих показників надійності та імовірнісного характеру роботи конструкції, визначаються розрахункові значення навантажень, фізичних характеристик матеріалів, та інші параметри, що відображають властивості конструкції чи умови її експлуатації. Цей дослідницький етап завершується розробкою норм проектування, які регламентують методи розрахунків та містять усі необхідні дані. На другому етапі інженер-проектувальник визначає перерізи елементів, виходячи з наведених у нормах проектування [58], [59], [60] граничних нерівностей та оперуючи детермінованими значеннями розрахункових параметрів, що значно спрощує його роботу. Елемент конструкції вважається досить надійним за обраним критерієм (міцністю, стійкістю, жорсткістю і т.п.), якщо для нього виконується відповідна гранична нерівність.

При такому підході необхідний рівень надійності конструкції забезпечується за рахунок правильного визначення усіх розрахункових параметрів на етапі розробки норм та відповідного їх вибору при виконанні проектних розрахунків, а регулювання надійності реалізується шляхом вибору розрахункових параметрів відповідно до заданих показників надійності. Наявність декількох коефіцієнтів надійності дозволяє окремо враховувати різні особливості роботи конструкцій та постійно удосконалювати розрахункову процедуру за рахунок уточнення цих коефіцієнтів.

На жаль, внаслідок взаємної залежності та не досить чіткого розмежування функцій коефіцієнтів надійності, метод граничних станів у його сучасному вигляді не забезпечує адекватного регулювання надійності несучих конструкцій. Не враховується також строк служби конструкцій, хоча він істотно впливає на їх роботу: у результаті старіння змінюються фізичні характеристики матеріалів, накопичуються експлуатаційні пошкодження внаслідок випадкових механічних впливів та корозії, відбуваються реологічні процеси повзучості та втоми матеріалів, зростає імовірність реалізації високих значень змінних навантажень.

Зміна фізичних характеристик матеріалів у процесі їх експлуатації повинна враховуватися при нормуванні розрахункових значень цих характеристик. Це завдання спрощується, оскільки внаслідок старіння характеристики міцності сталі змінюються несуттєво, а процес підвищення міцності бетону проходить порівняно швидко і практично завершується протягом строку служби навіть тимчасових споруд. Більш актуальною є проблема визначення довготривалої міцності деревини та пластмас, яка вирішується з урахуванням властивостей цих матеріалів та характеристик процесів навантажень.

Процеси накопичення експлуатаційних пошкоджень несучих конструкцій різних типів можуть бути вивчені на досвіді їх експлуатації та описані статистично. Це відкриває можливість розглядати несучу здатність конструкції як випадковий процес і в такому вигляді враховувати її в розрахунках надійності. В рамках методу граничних станів процес накопичення експлуатаційних пошкоджень може бути врахований коефіцієнтом умов роботи, або іншими, спеціальними коефіцієнтами надійності, що знижують розрахункову несучу здатність конструкції залежно від строку служби та умов експлуатації.

Процеси повзучості та втоми матеріалів реалізуються в результаті дії постійних та змінних навантажень і залежать від властивостей матеріалу та від характеристик процесів навантаження. Для їх урахування в рамках методу граничних станів доцільно встановити умовні розрахункові значення,

еквівалентні реальним випадковим процесам навантажень за їх впливом на конструкції.

Імовірність реалізації розрахункових навантажень має регулюватися шляхом урахування строку служби конструкцій при нормуванні змінних навантажень. Діючі СНиП [58] встановлюють єдині нормативні та розрахункові значення навантажень для усіх конструкцій, а строк служби лише деякою мірою враховується коефіцієнтом надійності за призначенням. Такий підхід є принципово невірним, бо він прямо пов'язує рівень надійності зі строком служби конструкції. В дійсності ці показники повинні бути незалежними, тому що існують тимчасові споруди з високими вимогами до надійності та навпаки.

Загальний підхід до регулювання надійності конструкцій розроблений на основі досліджень автора [28], [29], [45] та досвіду розробки зарубіжних норм [69], [70], де розрахункові навантаження відповідають певним строкам служби конструкцій. Пропонується розрахункові значення змінних навантажень визначати як функції строку служби конструкції, а необхідний рівень надійності встановлювати шляхом вибору коефіцієнта відповідальності з урахуванням призначення конструкції та значимості її елементів.

Можливість реалізації такого підходу до проектування показана в роботі автора [28] на прикладі розрахунку балки покриття при дії постійного та снігового навантаження. Поперечні перерізи балки визначалися шляхом прямого імовірнісного розрахунку на заданий строк служби та розрахунку методом граничних станів з урахуванням розрахункового снігового навантаження, залежного від строку служби балки. Порівняння показало, що при правильному виборі коефіцієнта відповідальності рекомендований спосіб дає такі ж поперечні перерізи балки, як і прямий імовірнісний розрахунок. Це свідчить про можливість проектування конструкцій з заданим строком служби та рівнем надійності в рамках методу граничних станів, при умові нормування розрахункових значень змінних навантажень залежно від строку служби конструкцій.

Виходячи з викладених вище міркувань щодо врахування строку служби конструкції та наведених у проекті ДБН [13] загальних формулювань граничних нерівностей, запишемо їх можливі варіанти для розрахунків елементів металевих або дерев'яних конструкцій при умові лінійної роботи. При розрахунках залізобетонних чи інших композитних конструкцій у наведених нижче формулах змінюється лише права частина, яка визначає несучу здатність конструктивного елемента.

Перевірка граничних станів першої групи виконується за нерівністю:

$$\gamma_n \psi \sum [\alpha_i F_i(T)] < \phi A R \gamma_c(T), \quad (1.1)$$

а граничних станів другої групи - за нерівністю:

$$\gamma_n \psi \sum [\delta_i F_i(T)] / \gamma_c(T) < \delta_{lim}. \quad (1.2)$$

де γ_n - коефіцієнт відповідальності, який враховує значимість та можливі наслідки відмови об'єкта у цілому, несучої конструкції чи її елемента і визначається залежно від необхідного рівня надійності елемента;

$F_i(T)$ - розрахункове значення i-того навантаження, що відповідає вибраному граничному стану;

α_i - коефіцієнт впливу i-того навантаження, що забезпечує перехід від навантаження до внутрішнього зусилля в конструктивному елементі та обчислюється методами будівельної механіки як зусилля від дії одиничного навантаження;

δ_i - обчислене методами будівельної механіки переміщення вибраної точки конструкції від одиничного значення i-того навантаження;

ψ - коефіцієнт сполучення навантажень, який враховує імовірність одночасної реалізації їх розрахункових значень;

ϕ - коефіцієнт, який забезпечує урахування особливостей роботи конструктивного елемента (наприклад, коефі-

цієнт поздовжнього згину чи коефіцієнт стійкості при позацентровому стискуванні);

A - відповідне до виду деформації розрахункове значення геометричної характеристики поперечного перерізу конструктивного елемента;

R - розрахунковий опір матеріалу, з якого виконано конструктивний елемент;

δ_{11m} - допустиме з точки зору експлуатаційної придатності переміщення конструкції, встановлене з урахуванням технологічних, фізіологічних і естетичних критеріїв;

$\gamma_c(T)$ - коефіцієнт умов роботи, який враховує нестандартні умови експлуатації (механічні пошкодження, корозійне зношування, низькі або високі температури і т.п.).

У нерівності (1.1) розрахункове зусилля в конструктивному елементі від сумарної дії усіх наявних навантажень порівнюється з розрахунковою несучою здатністю елемента. Нерівність (1.2) вимагає, щоб розрахункове значення переміщення обраної точки конструкції від сумарної дії усіх наявних навантажень не перевищувало встановленого нормами граничного значення. Граничні нерівності можуть видозмінюватися залежно від типу елемента, напруженого стану та виду розрахунку. Наприклад, нерівність (1.1) може перевірятися не в просторі внутрішніх зусиль, а як напруження в розрахунковій точці перерізу елемента. В розрахунках витривалості строк служби конструкції враховується при встановленні розрахункового опору залежно від кількості циклів навантаження, а при аналізі процесів повзучості будівельних матеріалів значення строку служби входить до розрахункових формул.

Розрахункові значення навантажень $F_1(T)$ та розрахункові опори матеріалу R повинні нормуватися таким чином, щоб при довільних значеннях строку служби T виконання нерівностей (1.1) та (1.2) забезпечувало наперед встановлений рівень надійності, однаковий для всіх конструктивних елементів. Методика, що забезпечує нормування змінних навантажень з урахуванням заданої надійності та строку служби конструкцій, розроблена і описана в наступних підрозділах. В розділах 2

та 3 наводяться результати нормування снігового та вітрового навантажень для території України, які можуть бути використані при проектуванні несучих будівельних конструкцій за методом граничних станів.

Коефіцієнт відповідальності γ_n є головним регулятором надійності несучих конструкцій. Підхід до його нормування базується на визначенні рівнів надійності конструкцій, оптимальних з точки зору врівноваження вартості конструкції та витрат, що можуть виникнути у результаті її відмови.

Коефіцієнт умов роботи $\gamma_c(T)$ повинен визначатися таким чином, щоб його урахування забезпечувало рівнонадійність конструкцій, що експлуатуються в звичайних та в нестандартних умовах. Як правило, такі умови експлуатації приводять до зменшення несучої здатності та жорсткості елементів внаслідок фізичного зношування, у зв'язку з чим коефіцієнт $\gamma_c(T)$ включено до чисельника правої частини нерівності (1.1) та до знаменника лівої частини нерівності (1.2). Коефіцієнт умов роботи може бути незалежним від строку служби, або зменшуватися при зростанні строку служби конструкції.

Коефіцієнт сполучення навантажень $\psi < 1$ визначається імовірнісними методами з умови рівнонадійності елементів конструкцій, розрахованих на дію різних комбінацій навантажень. В роботах [30], [35], [36] показано, що коефіцієнт сполучення залежить від імовірнісних характеристик процесів навантаження та часток цих навантажень у складі сумарного розрахункового зусилля в елементі конструкції. Дослідження [32], [67], дозволили пронормувати коефіцієнти сполучення снігового, вітрового та кранового навантажень для усієї території України. Практичні результати цих досліджень наведені в розділі 4.

Інші розрахункові параметри, що входять у граничні нерівності (1.1) та (1.2), мають невелику статистичну мінливість або взагалі є детермінованими величинами. Це значною мірою спрощує їх визначення, яке в деяких випадках зводиться до тривіального застосування відомих методів будівельної механіки.

Прийняті формулювання граничних нерівностей та принципи визначення розрахункових параметрів дозволяють проектувати несучі конструкції методом граничних станів з урахуванням заданого рівня надійності та строку служби. Необхідні для розрахунків параметри визначаються з використанням норм проектування за схемою, показаною на рисунку 1.1.



Рис. 1.1. Порядок визначення розрахункових параметрів при проектуванні конструктивних елементів

Отримані значення розрахункових параметрів враховуються в граничних нерівностях (1.1) та (1.2), за якими виконуються перевірки надійності, або визначаються необхідні геометричні характеристики поперечних перерізів при проектних розрахунках конструктивних елементів.

1.2. Класифікація та загальні принципи нормування навантажень на будівельні конструкції

Класифікація навантажень має відповідати їх фізичній природі та забезпечувати можливість розрахунку будівельних конструкцій різних видів з урахуванням усіх необхідних розрахункових ситуацій та граничних станів. Розрахунки, які необхідно виконувати при проектуванні більшості будівельних конструкцій, можна розділити на чотири типи:

- 1) перевірка міцності, стійкості і ін при однократному навантаженні в екстремальних умовах експлуатації (аварійна, стабільна чи перехідна розрахункова ситуація, яка може реалізуватися не частіше, ніж один раз за строк служби);
- 2) перевірка жорсткості та тріщиностійкості в режимі нормальної експлуатації (стабільна розрахункова ситуація);
- 3) перевірка витривалості при дії повторних навантажень (стабільна розрахункова ситуація);
- 4) урахування повзучості матеріалів при дії довготривалих навантажень (стабільна розрахункова ситуація).

Відповідно до проекту Державних будівельних норм [13], навантаження та впливи на несучі конструкції поділяються на механічні, до яких відноситься прямі механічні дії та примусові деформації конструкцій, та впливи немеханічної природи, що приводять до зниження несучої здатності конструкцій і можуть враховуватися коефіцієнтом умов роботи.

Механічні навантаження та впливи класифікуються: за причиною виникнення - на основні та аварійні; за способом прикладення у просторі - на фіксовані, вільні і комбіновані; за характером реакції конструкцій - на статичні і динамічні. Класифікація навантажень за часовою мінливістю розроблена в [45] з урахуванням численних результатів статистичних досліджень ряду навантажень. Залежно від часової мінливості, навантаження можуть мати до чотирьох розрахункових значень.

Експлуатаційне розрахункове значення характеризує умови нормальної експлуатації конструкції. У випадку постійного навантаження воно дорівнює найбільш імовірному, найчастіше -

середньому значенню. Для змінних навантажень експлуатаційне розрахункове значення визначається залежно від частки строку служби, протягом якої воно може бути перевищене. Як правило, експлуатаційне розрахункове значення використовується для перевірки граничних станів другої групи, пов'язаних з частковою втратою працездатності (виникнення недопустимих переміщень конструкції та недопустимо великого розкриття тріщин в залізобетонних конструкціях).

Граничне розрахункове значення використовується при перевірці граничних станів першої групи, перехід за які еквівалентний повній втраті працездатності конструкції. Імовірність виникнення такої події в процесі експлуатації повинна бути достатньо малою. Виходячи з цього, граничне розрахункове значення слід визначати, як максимум процесу навантаження, який з заданою імовірністю не може бути перевищений протягом встановленого строку служби конструкції. Ця імовірність нижче називається забезпеченістю розрахункового навантаження. Оскільки при зростанні довжини реалізації процесу навантаження його абсолютний максимум збільшується, граничне розрахункове значення змінного навантаження також повинно збільшуватися при зростанні строку служби конструкції. Для постійних навантажень граничне розрахункове значення повинне визначатися як максимально можливе значення навантаження, перевищення якого є малоімовірним.

Циклічне розрахункове значення змінного навантаження використовується для розрахунків на витривалість, які можуть бути виконані лише з урахуванням схематизованих процесів навантаження найпростішого виду (гармонічний процес з заданою частотою, мінімальним та максимальним значеннями). Оскільки реальні процеси змінних навантажень є випадковими і не можуть безпосередньо враховуватися в розрахунках на витривалість, циклічне розрахункове значення повинно визначатися як гармонічний процес, еквівалентний за результуючою дією на конструкцію до реального випадкового процесу навантаження. Циклічне розрахункове значення характеризує "середній" режим навантаження, а тому не повинно залежати від строку служби

конструкції. Час дії циклічного навантаження враховується при визначенні кількості циклів.

Квазіпостійне розрахункове значення служить для врахування реологічних процесів, які проходять під дією змінних навантажень. Воно встановлюється у вигляді детермінованого рівня навантаження, результуюча дія якого еквівалентна до реального випадкового процесу змінного навантаження. При його обчисленні слід враховувати як імовірнісні властивості процесу навантаження, так і реакцію матеріалу на цей процес. Наприклад, квазіпостійне розрахункове значення для аналізу повзучості бетону слід обчислювати з урахуванням визначених за кривою повзучості пластичних деформацій, що виникають у результаті послідовної дії усіх можливих рівнів навантаження. Для врахування різних реологічних процесів у різних матеріалах слід використовувати різні, відповідним чином встановлені, квазіпостійні розрахункові значення одних і тих же змінних навантажень.

Таблиця 1.1
Класифікація основних навантажень за часовою мінливістю

РОЗРАХУНКОВІ ЗНАЧЕННЯ	ОСНОВНІ НАВАНТАЖЕННЯ			
	постійні	змінні :		
		тривалі	повторні	епізодичні
експлуатаційне	2, 4	2	2	
граничне	1	1, 2	1, 2	1
квазіпостійне		4	4	
циклічне			3	

В таблиці 1.1 наведена схема класифікації навантажень на будівельні конструкції та їх розрахункових значень, яка запропонована в [45] і включена в проект ДБН [13]. Така класифікація відповідає запропонованій вище схемі регулювання надійності конструкцій, адекватно відображає фізичну природу

переважної більшості навантажень та забезпечує можливість виконання усіх необхідних розрахунків несучих будівельних конструкцій. Цифрами в таблиці вказані перелічені вище типи розрахунків, для виконання яких використовуються ті чи інші розрахункові значення, причому сама наявність цифр вказує на необхідність нормування цього розрахункового значення. За цією класифікацією аварійні навантаження можна віднести до змінних епізодичних, які характеризуються лише граничним розрахунковим значенням.

Згідно з наведеною класифікацією, **постійні навантаження** діють під час усього строку служби конструкції та практично не змінюються з часом. Класичним прикладом постійного навантаження є вага несучих та ізолюючих конструкцій. Для них досить встановити два розрахункові значення: експлуатаційне та граничне. При розрахунках на витривалість постійне навантаження може пом'якшувати коефіцієнт асиметрії циклу, який формується змінними навантаженнями. Для цього, як і для врахування реологічних процесів усіх видів, використовується експлуатаційне значення постійного навантаження.

Тривалі навантаження можуть змінюватися у часі і навіть не діяти на якихось етапах експлуатації конструкції, але час їх дії близький до строку служби конструкції. Як приклад, можна згадати вагу постійного обладнання чи вагу матеріалів у складських приміщеннях. Для тривалих навантажень нормуються три розрахункові значення, вказані в таблиці 1.1. Циклічне значення не має сенсу через малу кількість циклів навантаження.

Повторні навантаження змінюються таким чином, що час їх безперервної дії набагато менший від встановленого строку служби конструкції. До них можна віднести більшість атмосферних навантажень та впливів. Для повторних навантажень, як правило, встановлюються усі чотири розрахункові значення. Виняток можуть складати навантаження, які протягом строку служби конструкції реалізуються не більше декількох десятків разів і тому для них немає необхідності визначати циклічне розрахункове значення (наприклад, сніг або ожеледь).

Епізодичні навантаження також діють протягом невеликого часу і при цьому реалізуються лише кілька разів (найчастіше один раз) за строк служби конструкції. Як правило, епізодичні навантаження можуть розглядатися як аварійні, і для їх врахування при проектуванні конструкцій достатньо визначити лише граничне розрахункове значення, задавши також частоту його виникнення або імовірність реалізації протягом строку служби конструкції.

Особливу увагу слід звернути на передбачений наведеною класифікацією навантажень підхід до перевірки граничних станів другої групи. Залежно від призначення, особливостей роботи, умов експлуатації та вимог до жорсткості чи тріщиностійкості, усі конструкції необхідно поділити на два класи. Конструкції, для яких вихід за межі граничного стану другої групи може бути допущено один раз за визначений час, або визначену кількість разів за строк служби, розраховуються на дію граничного розрахункового значення навантаження з відповідним періодом повторюваності. Конструкції, для яких вихід за межі граничного стану може бути допущено протягом визначеної частки їх строку служби, розраховуються на дію відповідного експлуатаційного навантаження. Можуть також існувати конструкції, що перевіряються на дію і граничних, і експлуатаційних навантажень. Характер норми жорсткості, допустима частота її перевищення чи частка строку служби, протягом якого вона може бути перевищена, повинні визначатися нормами проектування конструкцій з урахуванням міжремонтних періодів, коефіцієнта готовності та інших факторів.

Діючи на території України норми проектування [58] базуються на спрощеній класифікації розрахункових значень навантажень. Усі навантаження представлені нормативними значеннями, які звичайно використовуються при перевірці граничних станів другої групи. Для розрахунків за першою групою граничних станів використовуються розрахункові навантаження, отримані шляхом множення нормативних значень на коефіцієнт надійності за навантаженням γ_f та інші коефіцієнти, що враховують особливості дії даного навантаження. Для урахування

реологічних ефектів використовуються спеціальні розрахункові значення навантажень. Характерні підходи до встановлення нормативних та розрахункових навантажень в СНиП 2.01.07-85 [58] показані в таблиці 1.2.

Принципова різниця в методах нормування різних навантажень, застосованих при розробці СНиП [58], викликала нічим не обгрунтовану та неконтрольовану різницю в забезпеченостях розрахункових значень цих навантажень. Так наприклад, в роботі [38] показано, що імовірності перевищення розрахункових значень снігового та вітрового навантажень, регламентованих діючими СНиП [58], можуть відрізнятись у 10-100 разів. Це приводить до різної надійності конструкцій, що сприймають навантаження різних видів. У випадку снігового навантаження ця надійність явно недостатня, про що свідчать численні аварії легких покриттів на півдні України.

Таблиця 1.2

Схеми нормування навантажень в СНиП 2.01.07-85

Навантаження	Імовірнісна модель	Нормативні значення	γ_r
Постійне	Розподіл випадкової величини	Номінальне за проектними даними та	1.05 1.3
Снігове	Послідовність річних максимумів	Матем. сподівання річного максимума	1.4 1.6
Вітрове	Послідовність місячних максимумів	3 періодом повторюваності 5 років	1.4
Ожеледь	Послідовність річних максимумів	3 періодом повторюваності 5 років	1.4
Кранове	Нормальний стаціонарний випадковий процес	Номінальне значення за паспортом крана	1.15

З іншого боку, нормування усіх навантажень з одним рівнем забезпеченості та використання існуючої системи коефіцієнтів надійності також приводить до значної варіації рівня надійності конструкцій, запроєктованих для різних строків служби, з різних матеріалів та на дію навантажень

різних видів. Про це свідчать результати виконаного автором аналізу надійності елементів будівельних конструкцій. Таким чином, забезпеченості розрахункових значень навантажень потрібно встановлювати залежно від імовірнісних властивостей цих навантажень.

Точне рішення, яке гарантує рівнонадійність конструкцій, зводиться до індивідуального визначення розрахункових значень навантажень та несучої здатності елементів у кожному конкретному випадку, як це запропоновано в [5], [6]. Але при цьому втрачається сенс методу граничних станів, при застосуванні якого задача нормування розрахункових параметрів вирішується окремо від задачі проектування конструкцій, а інженер-проектувальник користується встановленими значеннями розрахункових параметрів.

Більш реальним рішенням є встановлення уніфікованих рівнів забезпеченості розрахункових значень навантажень і міцності будівельних матеріалів, при використанні яких можна добитися наближеної рівнонадійності конструктивних елементів. Ця задача вирішена таким чином, щоб забезпеченість розрахункового значення міцності залежала тільки від виду матеріалу, а забезпеченість розрахункового навантаження - тільки від його статистичних характеристик. Такий підхід зручний ще й тим, що уніфіковані рівні забезпеченості можуть бути застосовані при нормуванні усіх навантажень, незалежно від їх фізичної природи. Це значно спрощує процес нормування та забезпечує уніфікацію результатів.

Рівень надійності конструктивного елемента об'єктивно визначається взаємним розташуванням кривих розподілу зусилля в цьому елементі та його несучої здатності. Можна вибрати безліч пар взаємно залежних розрахункових значень зусилля та несучої здатності, які відповідатимуть заданому рівню надійності. Уніфіковані забезпеченості розрахункового опору і розрахункових навантажень необхідно вибрати з існуючої множини можливих рішень таким чином, щоб розкид імовірностей відмови конструктивних елементів, запроєктованих з їх використанням, був мінімально можливим.

Процес змінного навантаження описується послідовністю максимальних значень, розподілених за законом Гумбеля [11]. Тоді зростання строку служби приводить до зменшення коефіцієнта варіації максимального за строк служби значення навантаження. Це дозволяє два параметри (строк служби та коефіцієнт варіації річних максимумів) замінити одним: коефіцієнтом варіації максимуму навантаження за строк служби. Враховуючи порівняно невеликий вплив інших факторів, нижче аналізуються два параметри: коефіцієнт варіації міцності матеріалу V_r та коефіцієнт варіації максимального за строк служби навантаження на конструкцію V_q .

Для кожної комбінації вказаних параметрів можна записати рівняння або алгоритм, який зв'яже імовірність безвідмовної роботи конструктивного елемента з коефіцієнтами варіації V_r і V_q та рівнями забезпеченості розрахункових значень навантаження β_q і несучої здатності β_r :

$$P = f(V_r, V_q, \beta_r, \beta_q) \quad (1.3)$$

Розглядаючи N значень коефіцієнта V_r та M значень коефіцієнта V_q , отримуємо $N \cdot M$ невідомих β_r і β_q в $N \cdot M$ рівняннях. Точне рішення системи рівнянь (1.3) відносно β_r і β_q можливе лише тоді, коли кількість невідомих дорівнює кількості рівнянь: $N + M = N \cdot M = 2$. При $N + M > N \cdot M$, що відповідає наявності лише одного матеріалу або одного навантаження, система рівнянь (1.3) має безліч рішень. При $N + M < N \cdot M$ система рівнянь (1.3) може бути вирішена наближено, тобто шляхом вибору таких значень невідомих, при яких нев'язки рівнянь будуть мінімально можливими.

Таким чином, визначення уніфікованих забезпеченостей розрахункових значень навантаження та міцності матеріалу зводиться до двохпараметричної задачі пошуку таких β_r і β_q , при яких розкид імовірностей відмови елементів буде мінімальним. Рішення знайдені за допомогою програми, яка реалізувала випадковий пошук [61] значень β_r і β_q шляхом мінімізації похибок проектування елементів. Враховані коефіцієнти варіації навантаження $0.1 < V_q < 0.5$, коефіцієнти

варіації міцності $V_r = 0.08, 0.135$ і 0.2 (сталь, бетон і дерево) та імовірності безвідмовної роботи елементів в межах від 0.9 до 0.999 . З метою збереження традиційних методів нормування розрахункових опорів будівельних матеріалів, забезпеченості розрахункових навантажень β_q обчислювалися при фіксованих забезпеченостях розрахункового опору β_r , прийнятих при розробці сучасних норм проектування сталевих, залізобетонних та дерев'яних будівельних конструкцій.

Результати розрахунків наведені в таблиці 1.3 та на рисунку 1.2, де зображена залежність необхідної забезпеченості розрахункового навантаження β_q від надійності елемента P та коефіцієнта варіації максимуму навантаження V_q . З цих даних видно, що забезпеченості розрахункових навантажень повинні змінюватися в досить широких межах, зростаючи при збільшенні P та V_q .

Таблиця 1.3

Забезпеченості розрахункових навантажень β_q при традиційних методах нормування розрахункового опору

Надійність елемента P	Забезпеченості розрах. навантажень при $V_q =$				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.9	0.001	0.239	0.466	0.574	0.635
0.95	0.025	0.445	0.635	0.714	0.757
0.99	0.571	0.812	0.875	0.902	0.917
0.995	0.796	0.897	0.928	0.943	0.951
0.999	0.981	0.983	0.986	0.988	0.989

Необхідний рівень надійності будівельних конструкцій завжди встановлювався на основі досвіду експлуатації споруд, будівель та окремих конструкцій. Спроби економіко-математичної оптимізації рівня надійності зроблені лише для окремих конструкцій з чисто економічними наслідками відмов, а тому отримані результати не можуть бути поширені на конструкції інших класів. Виходячи з цього, необхідний для нормування навантажень показник надійності конструктивних елементів встановлений за результатами аналізу надійності реальних конструкцій, запроектованих за чинними нормами [58], [60].

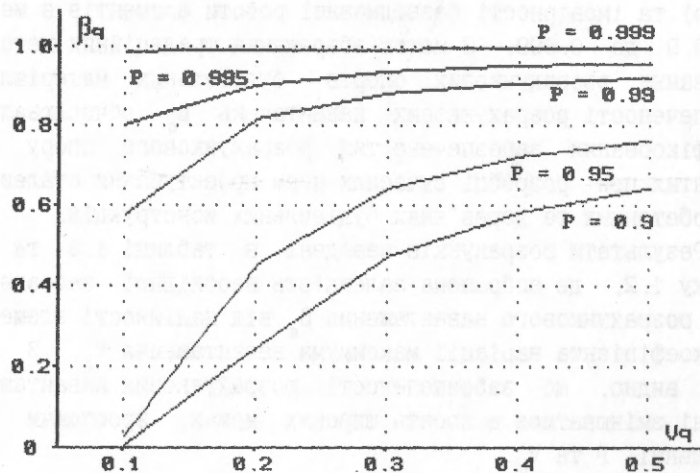


Рис. 1.2 Необхідні забезпеченості розрахункових значень навантажень залежно від P і V_q

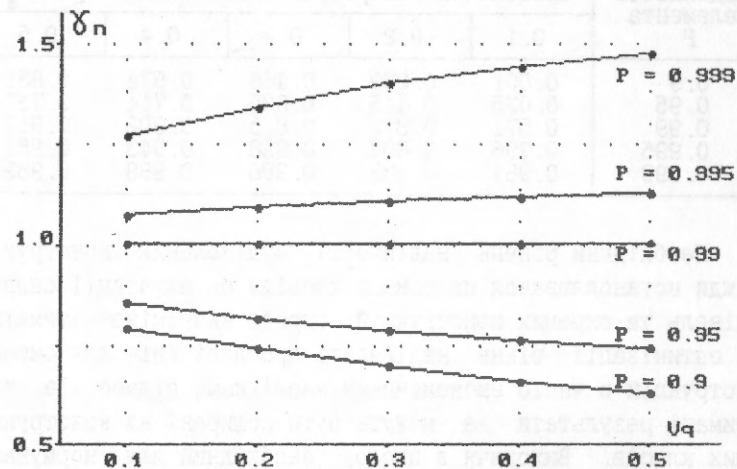


Рис. 1.3 Залежність коефіцієнта відповідальності від надійності елемента і варіації навантаження

Дослідження типових сталевих крокв'яних ферм при дії широкого спектру значень постійного та снігового навантажень показало, що при нормуванні розрахункових параметрів методу граничних станів мінімально достатнім рівнем надійності конструктивних елементів можна вважати імовірність безвідмовної роботи $P(T) = 0.99$ протягом встановленого строку служби конструкції $T = 50$ років. Для цього випадку наведена в таблиці 1.3 залежність необхідної забезпеченості розрахункового значення навантаження від коефіцієнта варіації V_q його максимуму за строк служби конструкції описується аналітичним виразом:

$$P_q = V_q / (0.069 + 0.937 V_q) \quad (1.4)$$

Згідно з запропонованою схемою регулювання надійності, проектування конструкцій з заданими імовірностями безвідмовної роботи забезпечується коефіцієнтом відповідальності γ_n . Його значення обчислені з використанням даних, отриманих при оптимізації забезпеченостей розрахункових навантажень. Урахування отриманих значень γ_n в лівій частині граничних нерівностей (1.1) і (1.2) редукує розрахункові значення навантажень, встановлені з забезпеченістю (1.4), до значень, які відповідають заданому рівню надійності конструктивного елемента P . Як видно з рисунка 1.3, коефіцієнт відповідальності залежить від заданого рівня надійності P та коефіцієнта варіації навантаження V_q . Для практичного застосування рекомендується наближена залежність, осереднена по значеннях V_q в межах одного рівня надійності:

$$\gamma_n = 0.34 - 0.33 \lg(1 - P) \quad (1.5)$$

Виходячи з отриманих результатів, нижче реалізується наступний підхід до нормування змінних навантажень. Граничні розрахункові значення встановлюються таким чином, щоб з забезпеченістю (1.4) вони не могли перевищуватися протягом встановленого строку служби конструкції. Необхідна імовірність безвідмовної роботи конструкції забезпечується

урахуванням коефіцієнта відповідальності за (1.5). При цьому наближено реалізується проектування елементів несучих будівельних конструкцій для заданого рівня надійності та строку служби.

1.3. Імовірнісні моделі атмосферних навантажень

Для відображення процесів навантаження будівельних конструкцій застосовуються різноманітні імовірнісні моделі, вибір яких обумовлюється фізичною природою навантаження, особливостями статистичних даних, їх доступністю та трудомісткістю обробки статистичних даних, а також кінцевою метою дослідження. Досвід статистичних досліджень снігового та вітрового навантажень [23-30], [41-44] показує, що для їх нормування достатньо двох імовірнісних моделей:

- диференційовний випадковий процес, за яким обчислюються розрахункові значення усіх видів;
- послідовність максимальних значень за характерні проміжки часу, за якою обчислюються граничні розрахункові значення.

Таке звуження набору імовірнісних моделей сприяє уніфікації методів обчислення розрахункових значень та забезпечує співставність результатів нормування.

Імовірнісна модель диференційовного випадкового процесу дозволяє найбільш точно враховувати усі особливості процесів змінних навантажень. Для її застосування необхідно шляхом статистичної обробки реалізації встановити закон розподілу ординати та значення ефективної частоти. У деяких випадках необхідно також визначити нормовану кореляційну функцію. Статистичні характеристики стаціонарного процесу не змінюються у часі, що значною мірою спрощує їх визначення за дослідними даними та подальші операції з отриманою моделлю.

У зв'язку з сезонними змінами клімату, процеси атмосферних навантажень мають сезонний тренд характеристик і не можуть вважатися стаціонарними. В роботах [27], [31], [47]

показано, що снігове та вітрове навантаження можуть бути подані у формі квазістаціонарних диференційовних випадкових процесів з річним періодом нестационарності закону розподілу ординати та зі стаціонарною частотною структурою. Згідно з [31], для цього необхідно задати постійні у часі значення коефіцієнтів варіації V та асиметрії A , а також функцію математичного сподівання у вигляді алгебраїчного полінома третього ступеня:

$$M(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (1.6)$$

Ці числові характеристики дають можливість встановити змінний у часі закон розподілу ординати з інтегральною функцією $F(q, t)$ та густиною $f(q, t)$. Для процесу снігового навантаження, значення якого у літній період дорівнює нулю, необхідно також визначити час початку та закінчення зими.

Частотна структура процесу навантаження відображується постійним у часі значенням ефективної частоти ω та нормованою кореляційною функцією у вигляді експоненти:

$$R(\tau) = \exp(-\alpha\tau) \quad (1.7)$$

де τ - інтервал часу між ординатами процесу;

α - параметр, визначений за дослідною корелограмою.

Розподіл ординати випадкового процесу снігового навантаження на території України має досить складний характер і не може бути описаний поширеними імовірнісними законами. В роботах [27], [31] з використанням досить великого обсягу метеорологічних даних обґрунтована можливість застосування закону розподілу, який С.Ф.Пічугін [42-43], назвав поліномо-експоненціальним.

Поліномо-експоненціальний розподіл, який застосовується для апроксимації розподілів ординати атмосферних навантажень [31], має густину

$$f(x) = \exp(C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3) \quad (1.8)$$

Інтегральна функція поліномо-експоненціального розподілу не виражається аналітично і може бути обчислена за формулою

$$F(X) = \int_a^X \exp(C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3) dx \quad (1.9)$$

шляхом числового інтегрування.

Параметри $C_0 \dots C_3$ поліномо-експоненціального розподілу (1.8) визначаються методом моментів як рішення системи трансцендентних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &= 1 \\ \int_a^b x f(x) dx &= M \\ \int_a^b (x - M)^2 f(x) dx &= S^2 \\ \int_a^b (x - M)^3 f(x) dx &= A S^3 \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

де M , S і A - математичне сподівання, стандарт і коефіцієнт асиметрії випадкової величини;

$f(x)$ - густина розподілу (1.8);

a , b - область визначення розподілу, яка може приймати довільні значення.

Через те, що інтеграли в рівняннях (1.10) визначаються числовими методами, область визначення розподілу повинна бути кінечною. Для необмежених розподілів нескінченно великі значення a чи b імітуються достатньо великими числами, наприклад, $M \pm (10+30) S$, але тоді закон розподілу (1.8), (1.9) не слід використовувати за межами області визначення $a < x < b$, що враховувалася при обчисленні параметрів.

Залежно від параметрів $C_0 \dots C_3$, густина розподілу (1.8) може приймати досить складні та різноманітні форми, що дозволяє застосовувати його при імовірнісному поданні різних

процесів навантаження. При деяких наборах параметрів поліномо-експоненціальний розподіл вироджується у часткові випадки (нормальний, експоненціальний, гама-розподіл та інші).

Розподіл ординати випадкового процесу вітрового навантаження також може описуватися поліномо-експоненціальним законом (1.8), або законом Вейбулла, можливість застосування якого обґрунтована в численних дослідженнях метеорологів [2], [15], [57], [74] і який можна вважати загальноприйнятим для імовірнісного подання результатів строкових вимірювань швидкості вітру.

Розподіл Вейбулла має густину та інтегральну функцію

$$f(x) = \alpha \beta x^{\alpha-1} \exp(-\beta x^\alpha); \quad (1.11)$$

$$F(x) = 1 - \exp(-\beta x^\alpha), \quad (1.12)$$

параметри яких α і β визначаються з урахуванням отриманих при статистичній обробці даних значень математичного сподівання M та коефіцієнта варіації V . Параметр форми α обчислюється, як корінь трансцендентного рівняння

$$\frac{\Gamma(1 + 2/\alpha)}{[\Gamma(1 + 1/\alpha)]^2} = V + 1, \quad (1.13)$$

де $\Gamma(\cdot)$ - гамма-функція. При розв'язанні рівняння (1.13) першим наближенням доцільно вважати $\alpha \approx 1/V$.

Параметр β визначається за формулою

$$\beta = [\Gamma(1 + 1/\alpha) / M]^\alpha, \quad (1.14)$$

де α - значення параметра, обчислене з рівняння (1.13).

Розподіл Вейбулла визначений в області додатніх чисел, тобто він існує при $x > 0$. Якщо параметр $\alpha > 1$, густина розподілу Вейбулла має одновершинний характер з правосторонньою асиметрією, значенням $f(x) = 0$ при $x = 0$ та коефіцієнтом варіації $V < 1$. Якщо $\alpha < 1$, густина розподілу має експонентоподібний характер з $f(x) \rightarrow \infty$ при $x = 0$ та коефіцієнтом

варіації $V > 1$. Коефіцієнт асиметрії розподілу Вейбулла зв'язаний з його коефіцієнтом варіації чи параметром α .

Для імовірнісного подання випадкових процесів інших навантажень на будівельні конструкції часто застосовується також експоненціальний, нормальний та деякі інші закони розподілу.

Експоненціальний розподіл є широко вживаним частинним випадком розподілу Вейбулла при $\alpha = 1$. Його густина та інтегральна функція мають вигляд:

$$f(x) = \alpha \exp(-\alpha x) . \quad (1.15)$$

$$F(x) = 1 - \exp(-\alpha x) ; \quad (1.16)$$

Характерною ознакою експоненціального розподілу є рівність коефіцієнта варіації одиниці, а тому його параметр α може визначатися через математичне сподівання M або стандарт S :

$$\alpha = 1 / M = 1 / S . \quad (1.17)$$

Експоненціальний розподіл визначений в області додатніх чисел і має постійне значення коефіцієнта асиметрії $A = 2$.

Нормальний розподіл, або розподіл Гаусса є граничним розподілом, до якого збігається сума великої кількості випадкових величин. Його густина має вигляд:

$$f(x) = \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - M)^2}{2 S^2} \right] . \quad (1.18)$$

де M і S - математичне сподівання та стандарт розподілу.

Інтегральна функція нормального розподілу не має аналітичного виразу і визначається за таблицями [7], [8] або обчислюється за апроксимуючими формулами [19]. Область визначення нормального розподілу необмежена, а його коефіцієнт асиметрії дорівнює нулю.

Імовірнісна модель послідовності максимальних значень часто використовується для відображення змінних навантажень. Для її розробки реалізація процесу навантаження розділяється

на рівні відрізки, довжина яких τ повинна відповідати характерному для даного навантаження інтервалу часу (рік, місяць, доба) та забезпечувати незалежність ординат, віддалених на цей інтервал. На кожному інтервалі вибирається максимальне значення ординати і таким чином формується послідовність максимумів, яку можна вважати вибіркою незалежних даних. Завдяки рівномірності поділу на інтервали, послідовність максимальних значень несе інформацію про частотну структуру вихідного процесу. Така імовірнісна модель дозволяє за схемою незалежних випробувань визначати розрахункові значення змінних навантажень з урахуванням заданої забезпеченості P та строку служби конструкції T .

У більшості випадків вибірка максимумів описується подвійним експоненціальним законом розподілу Гумбеля, який названий Е.Гумбелем [11] розподілом максимумів першого типу. В [11] він виведений, як граничний розподіл максимуму випадкової величини при нескінченно великому обсязі екстремальної вибірки (кількості незалежних значень навантаження, з яких вибирається один максимум). Отже, застосування розподілу Гумбеля для апроксимації послідовностей максимальних значень змінних навантажень має чітке фізичне обґрунтування.

Розподіл Гумбеля має густину та інтегральну функцію

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \exp \left[\frac{\alpha - x}{\beta} - \exp \left(\frac{\alpha - x}{\beta} \right) \right] ; \quad (1.19)$$

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(\frac{\alpha - x}{\beta} \right) \right] . \quad (1.20)$$

де α і β - характеристичний екстремум (мода) і екстремальна інтенсивність (параметр масштабу) розподілу.

В граничному випадку, при великому обсязі екстремальної вибірки, параметри розподілу Гумбеля визначаються через математичне сподівання M та стандарт S вибірки максимумів за формулами:

$$\alpha = M - 0.45 S ; \quad \beta = 0.78 S . \quad (1.21)$$

При порівняно невеликих обсягах екстремальної вибірки розподіл Гумбеля лише наближено апроксимує фактичний розподіл максимуму, що породжує проблему оцінювання його параметрів.

В монографії [11] показано, що незалежно від виду вихідного розподілу $F_0(x)$, з якого вибираються екстремуми, точна функція розподілу максимальних значень $F(x)$ може бути визначена через обсяг екстремальної вибірки n (кількість незалежних вихідних даних, з яких вибирається максимум):

$$F(x) = [F_0(x)]^n \quad (1.22)$$

З ростом n точний розподіл максимумів (1.22) наближається до граничного розподілу Гумбеля з параметрами, які рекомендується обчислювати за методикою, розробленою на основі [11]. Відповідно до прийнятої форми запису функції розподілу Гумбеля (1.20), за [11] можна записати вираз для параметра масштабу:

$$\beta = [1 - F_0(\alpha)] / f_0(\alpha) = 1 / [n f_0(\alpha)] \quad (1.23)$$

де $F_0(\alpha)$ та $f_0(\alpha)$ - значення інтегральної функції та густини розподілу вихідної випадкової величини при аргументі α , визначеному з рівняння:

$$1 - F_0(\alpha) = 1 / n \quad (1.24)$$

Підставивши до (1.23) і (1.24) конкретні вирази для функції $F_0(\alpha)$ та густини $f_0(\alpha)$ вихідного розподілу, можна отримати формули або алгоритм для визначення параметрів граничного розподілу максимальних значень α і β через відомі параметри розподілу ординати конкретного навантаження.

Проблема полягає в тому, що при нормуванні навантажень за імовірнісною моделлю послідовності максимальних значень статистичні характеристики та параметри вихідного розподілу $F_0(x)$ залишаються невідомими. Як правило, відомий лише вид вихідного розподілу та отримані у результаті статистичної обробки характеристики вибірки максимумів. Для визначення параметрів граничного розподілу Гумбеля у такій ситуації

використана запропонована в [11] загальна схема оцінювання за допомогою імовірнісного паперу. Пошукувані параметри розподілу Гумбеля визначаються за формулами:

$$\alpha = M - k_a S ; \quad \beta = k_b S \quad (1.25)$$

де M , S - математичне сподівання і стандарт наявної вибірки максимальних значень;

k_a , k_b - перехідні коефіцієнти, які враховують вид вихідного розподілу та обсяг екстремальної вибірки, а також коефіцієнт варіації та обсяг вибірки максимальних значень.

Для визначення коефіцієнтів k_a і k_b числові характеристики вибірки максимальних значень, розподіленої за (1.22) і найкращим чином розташованої на імовірнісному папері розподілу Гумбеля, співставляються з обчисленими теоретичним шляхом параметрами граничного розподілу (1.20), що відповідають відомому вихідному розподілові та обсягові екстремальної вибірки. Обчислення виконуються за розробленим алгоритмом для заданого обсягу екстремальної вибірки та ряду значень вихідних даних, характерних для досліджуваного навантаження. Це дозволяє отримати залежності k_a і k_b від обсягу N та коефіцієнта варіації V вибірки максимальних значень та апроксимувати їх аналітичними виразами, які й використовуються для оцінювання параметрів розподілу Гумбеля за формулами (1.25).

Аналіз метеорологічних даних показав, що вибірки річних максимумів снігового навантаження формуються з розподілів ненульових значень ваги снігового покриву, а тому саме ці розподіли слід вважати вихідними при визначенні перехідних коефіцієнтів k_a і k_b . З метою узагальнення результатів вихідну вибірку ненульових значень снігового навантаження вважаємо розподіленою за поліномо-експоненціальним законом (1.8) з одиничним математичним сподіванням, заданим коефіцієнтом варіації V_0 та коефіцієнтом асиметрії, визначеним за наближеною залежністю: $A_0 = 2.7 \cdot V_0 - 0.66$. Середній обсяг екстремальної вибірки прийнято рівним $n = 4$ незалежних даних

протягом зими. Розрахунки за розробленим алгоритмом дозволили отримати залежності коефіцієнтів k_a і k_b від коефіцієнта варіації V та обсягу N вибірки річних максимумів снігового навантаження, які апроксимовані алгебраїчними поліномами:

$$k_a = 0.52 + 0.415 \cdot V - 0.357 \cdot V^2 - 0.00104 \cdot N + 0.00114 \cdot N \cdot V; \quad (1.26)$$

$$k_b = 1.63 - 1.494 \cdot V + 0.304 \cdot V^2 - 0.00167 \cdot N + 0.00161 \cdot N \cdot V.$$

Вихідні вибірки швидкості та тиску вітру вважаються розподіленими за законом Вейбулла (1.12) з коефіцієнтами варіації $0.4 < V_0 < 3.0$, а обсяг екстремальної вибірки для місячних максимумів прийнято рівним $n = 100$ даних. Отримані при таких передумовах залежності k_a і k_b від обсягу вибірки місячних максимумів N та її коефіцієнта варіації V апроксимовані алгебраїчними поліномами:

$$k_a = 0.41 - 0.0000344 \cdot N + 2.78 \cdot 10^{-8} \cdot N^2 + 0.313 \cdot V - 0.25 \cdot V^2 - 0.0000233 \cdot V \cdot N; \quad (1.27)$$

$$k_b = 0.98 - 0.000074 \cdot N + 4.37 \cdot 10^{-8} \cdot N^2 - 0.711 \cdot V + 0.12 \cdot V^2 + 0.00000997 \cdot V \cdot N.$$

При невідомому виді розподілу, з якого вибиралися максимуми, доцільно скористатися наведеною в [11] таблицею 6.2.3. Для зручності використання табличні дані перетворені в запропоновані вище перехідні коефіцієнти k_a , k_b та апроксимовані виразами:

$$k_a = 0.45 + 0.34 N^{-0.69}; \quad (1.28)$$

$$k_b = 0.78 + 1.54 N^{-0.75}.$$

Ці формули можуть застосовуватися для оцінюванні параметрів (1.25) розподілу Гумбеля при обробці вибірок максимальних значень навантажень, коли невідомі ні обсяг екстремальної вибірки, ні вихідний розподіл, з якого вибиралися максимуми.

Застосування описаних вище імовірнісних моделей квазі-стаціонарних диференційовних випадкових процесів є безумовно необхідним при змінних у часі характеристиках конструкції та при урахуванні сумісної дії декількох процесів навантаження, але при нормуванні окремого навантаження його імовірнісна модель може бути спрощена.

В [32] отримана формула для визначення частоти перевищень детермінованого рівня Q квазістаціонарним випадковим процесом:

$$\lambda(Q) = 0.4 \omega \int_0^{1/\text{рік}} S(t) f(Q, t) dt, \quad (1.29)$$

де ω - постійне у часі значення ефективної частоти;

$S(t)$ - функція стандарту випадкового процесу навантаження;

$f(Q, t)$ - двовірна густина розподілу ординати, аргументами якої є рівень навантаження Q та момент часу t .

В роботах [47], [49] показано, що при незмінному у часі коефіцієнті варіації квазістаціонарний випадковий процес навантаження є стаціонарним по нормованому розподілові ординати. Підінтегральна функція в формулі (1.29) дорівнює самій густині нормованого розподілу ординати процесу навантаження, що дозволяє вважати її незмінною у часі. Завдяки цьому операція інтегрування зводиться до множення на час а формула (1.29) спрощується:

$$\lambda(Q) = 0.4 \omega S f(Q), \quad (1.30)$$

де $f(Q)$ - густина розподілу ординати, отримана з урахуванням усіх даних протягом року;

S - стандарт цього розподілу;

ω - ефективна частота в 1/рік.

Формула (1.30) відповідає імовірнісній моделі стаціонарного диференційовного процесу, яка й може бути використана для визначення розрахункових значень змінних навантажень.

Застосування схеми незалежних випробувань до нестационарної послідовності незалежних значень чи максимумів навантаження дає формулу для визначення імовірності перевищення детермінованого рівня Q протягом одного року:

$$\lambda = \int_0^{1pk} \left[\int_Q^{\infty} f(q, t) dq \right] dt = \int_Q^{\infty} \left[\int_0^{1pk} f(q, t) dt \right] dq, \quad (1.31)$$

де $f(Q, t)$ - двовірна густина розподілу, аргументами якої є рівень навантаження Q та момент часу t .

Правильна область інтегрування дозволила змінити порядок інтегрування в другій формулі (1.31). У ній внутрішній інтеграл дорівнює щільності розподілу $f(q)$ об'єднаної вибірки, отриманої з урахуванням усіх даних протягом року. Відповідна заміна приводить до спрощеної формули:

$$\lambda = \int_Q^{\infty} f(q) dq. \quad (1.32)$$

З наведених викладок видно, що розрахункові значення атмосферних навантажень можуть обчислюватися за моделями диференційованого випадкового процесу або послідовності місячних максимумів без урахування сезонної нестационарності процесу навантаження. Необхідні статистичні характеристики та закон розподілу $f(q)$ визначаються за об'єднаною вибіркою даних, взятих протягом усього року. Слід лише зауважити, що вид закону розподілу об'єднаної вибірки $f(q)$ може відрізнятися від розподілу $f(q, t)$ при фіксованому t , що необхідно перевірити за критеріями узгодженості.

1.4. Методи обчислення граничних та експлуатаційних розрахункових значень змінних навантажень

Граничне розрахункове значення Q_m дорівнює максимуму змінного навантаження, який з заданою забезпеченістю P не може бути перевищений протягом встановленого строку служби

конструкції T . Для обчислення граничних розрахункових значень використовуються імовірнісні моделі змінних навантажень, описані в попередньому підрозділі. Виходячи з експоненціального закону надійності [5], допустима частота перевищення граничного розрахункового значення змінного навантаження має бути рівною

$$\lambda = - \ln(P) / T \approx (1 - P) / T. \quad (1.33)$$

Наближена рівність справедлива при високих забезпеченостях, наприклад $P > 0.9$.

Імовірнісна модель диференційованого випадкового процесу дозволяє визначати частоту перевищень процесом навантаження $q(t)$ детермінованого значення Q_m , рівного граничному розрахунковому навантаженню, за формулами:

$$\lambda(Q_m) = W f(Q_m); \quad (1.34)$$

$$W = \omega S / \sqrt{2\pi} = 0.4 \omega S, \quad (1.35)$$

де $f(Q_m)$ - щільність розподілу ординати;
 W - математичне сподівання додатньої похідної;
 S - стандарт розподілу ординати;
 ω - ефективна частота процесу навантаження.

Математичне сподівання додатньої похідної процесу вітрового навантаження, отриманого в результаті квадратичного перетворення процесу швидкості вітру, залежить від рівня Q_m , для якого визначається частота перевищень:

$$W = W(Q_m) = \omega \sqrt{Q_m S / 2\pi} = 0.4 \omega \sqrt{Q_m S}. \quad (1.36)$$

Для обчислення граничного розрахункового значення змінного навантаження $Q_m(T)$ необхідно підставити до (1.34) математичне сподівання додатньої похідної (1.35) чи (1.36), допустиму частоту перевищень $\lambda(Q_m)$ за (1.33), та густину розподілу ординати, що відповідає даному навантаженню. Розв'язок отриманого рівняння відносно Q_m і є пошукуваним розрахунковим значенням навантаження.

Підстановка до (1.34) експоненціального розподілу (1.15) та значення (1.35), логарифмування отриманого рівняння та очевидні перетворення приводять до формули:

$$Q_m = M \ln(0.4 \omega / \lambda), \quad (1.37)$$

де M - математичне сподівання процесу навантаження;

λ - допустима частота перевищень розрахункового значення навантаження за формулою (1.33).

При нормальному розподілі (1.18) ординати випадкового процесу навантаження з математичним сподіванням M та стандартом S його граничне розрахункове значення обчислюється за відомою формулою Райса [8], яку в даному випадку доцільно записати у вигляді:

$$Q_m = M + S \sqrt{2 \ln(0.16 \omega / \lambda)}. \quad (1.38)$$

Підстановка до (1.34) густини розподілу Вейбулла (1.11) та математичного сподівання додатньої похідної (1.35) дає рівняння

$$0.4 \omega S Q_m^{\alpha-1} \alpha \beta \exp(-\beta Q_m^\alpha) = \lambda, \quad (1.39)$$

яке є трансцендентним і повинно вирішуватися одним з відомих числових методів.

При застосуванні поліномо-експоненціального розподілу (1.8) та математичного сподівання додатньої похідної (1.35) отримуємо рівняння

$$0.4 \omega S \exp(C_0 + C_1 Q_m + C_2 Q_m^2 + C_3 Q_m^3) = \lambda, \quad (1.40)$$

яке шляхом логарифмування обох частин можна звести до кубічного. Враховуючи, що застосування формул Кардано [19] не дає можливості отримати замкнутий аналітичний вираз для Q_m , рівняння (1.40) також зручніше вирішувати чисельно.

Імовірнісна модель послідовності максимальних значень базується на використанні розподілу Гумбеля. Двічі логарифмуючи функцію розподілу (1.20), можна знайти квантиль q , що відповідає заданому значенню функції розподілу F :

$$q = \alpha - \beta \ln[-\ln(F)], \quad (1.41)$$

Допустиме значення функції розподілу в одному випробуванні визначається через (1.33) з урахуванням того, що в одиницю часу реалізується $n = 1 / \tau$ максимумів:

$$F = 1 - \lambda / n = 1 - \lambda \tau = 1 + \tau \ln P / T. \quad (1.42)$$

Підстановка (1.42) до (1.41) дозволяє отримати формулу для обчислення граничного розрахункового значення змінного навантаження $Q_m(P, T)$, яке з імовірністю P не може бути перевищене протягом T років:

$$Q_m(P, T) = \alpha - \beta \ln[-\ln(1 + \tau \ln P / T)], \quad (1.43)$$

де α, β - параметри розподілу Гумбеля, обчислені за (1.25);

τ - періодичність вибірки максимумів.

Для нормування за середнім періодом повторюваності можна скористатися формулою (1.43) при забезпеченості $P = 0.368$.

Експлуатаційне розрахункове значення змінного навантаження $Q_e(\mu)$ залежить від частки строку служби конструкції μ , протягом якої воно може перевищуватися. Значення $Q_e(\mu)$ дорівнює квантилю закону розподілу ординати випадкового процесу навантаження, що відповідає значенню функції розподілу $F(Q_e) = 1 - \mu$, і обчислюється як корінь рівняння

$$\mu = 1 - F(Q_e) = \int_{Q_e}^{\infty} f(q) dq, \quad (1.44)$$

у якому $F(Q_e)$ та $f(q)$ - інтегральна функція та густина розподілу ординати випадкового процесу навантаження.

Для деяких законів розподілу рівняння (1.44) може бути розв'язане аналітично; в інших випадках слід застосовувати один з методів чисельного розв'язування трансцендентних рівнянь. Розв'язки рівняння (1.44) для функцій розподілу, що часто застосовуються при нормуванні навантажень, наводяться нижче.

Для навантаження, розподіленого за законом Вейбулла (1.12), експлуатаційне розрахункове значення дорівнює

$$Q_e = \left[-\frac{\ln(\mu)}{\beta} \right]^{1/\alpha} \quad (1.45)$$

У випадку експоненціального закону розподілу навантаження з математичним сподіванням M отримуємо

$$Q_e = -M \cdot \ln(\mu) \quad (1.46)$$

При нормальному розподілі ординати процесу навантаження його експлуатаційне розрахункове значення обчислюється за формулою

$$Q_e = M + S \cdot t, \quad (1.47)$$

де M і S - математичне сподівання і стандарт розподілу;
t - квантиль нормованого розподілу Гаусса визначений для функції розподілу $F(t) = 1 - \mu$.

У випадку поліномо-експоненціального закону розподілу експлуатаційне розрахункове значення змінного навантаження обчислюється як корінь рівняння

$$1 - \int_0^{Q_e} \exp(C_0 + C_1 q + C_2 q^2 + C_3 q^3) dq = \mu, \quad (1.48)$$

у якому $C_0 \dots C_3$ - параметри розподілу ординати процесу навантаження, визначені через його математичне сподівання, стандарт та коефіцієнт асиметрії.

При нормуванні навантажень параметри законів розподілу визначаються методом моментів через статистичні характеристики, обчислені за вибіркою скінченного обсягу, а тому вони є випадковими величинами. З цього випливає, що розрахункові значення $Q_m(P, T)$ і $Q_e(\mu)$ також є випадковими величинами, а наведені вище формули дають оцінки математичних сподівань цих розрахункових значень. Дисперсії D_q оцінок розрахункових значень $Q_m(P, T)$ і $Q_e(\mu)$ визначаються за методикою [40] шля-

хом лінеаризації відповідних формул для їх обчислення або з застосуванням методу Монте-Карло.

Дисперсії D_q усіх розрахункових значень навантажень обернено пропорційні обсягу вибірки N, за якою обчислювалися статистичні характеристики навантаження та його розрахункові значення. Це дозволило ввести характеристику точності, яка в роботі [40] названа нормованою похибкою оцінки розрахункового навантаження:

$$\epsilon = \sqrt{N D_q} / Q. \quad (1.49)$$

В формулі (1.49) через Q позначені оцінки граничного $Q_m(P, T)$ чи експлуатаційного $Q_e(\mu)$ розрахункового значення змінного навантаження, обчислені за викладеною вище методикою.

Запропонована характеристика точності (1.49) дозволяє оцінити відносну похибку (у відсотках) розрахункового значення $\Delta\%$, верхню межу довірчого інтервалу для розрахункового навантаження Q_{max} , а також обсяг вибірки N_{min} , необхідної для обчислення розрахункового навантаження з заданою точністю $\Delta\%$, за формулами:

$$\Delta\% = 100 t_p \epsilon / \sqrt{N}, \quad (1.50)$$

$$Q_{max} = Q (1 + t_p \epsilon / \sqrt{N}), \quad (1.51)$$

$$N_{min} = 10000 (t_p \epsilon / \Delta\%)^2, \quad (1.52)$$

де Q - оцінка розрахункового навантаження, обчислена за формулою чи алгоритмом, наведеними вище;

t_p - квантиль нормального розподілу, що відповідає заданій довірчій імовірності;

N - обсяг вибірки або кількість незалежних ординат у реалізації випадкового процесу навантаження, які використані для оцінювання розрахункового значення.

За методикою [40] для усіх наведених вище варіантів обчислення розрахункових значень встановлені залежності нормованих похибок розрахункових навантажень від впливаючих

факторів. Отримані формули дозволяють оцінювати точність визначення граничних та експлуатаційних розрахункових значень змінних навантажень залежно від обсягу використаних статистичних даних та способу обчислення.

1.5. Методика територіального районування розрахункових значень атмосферних навантажень

В результаті обчислень за викладеними вище методами, для кожної метеостанції визначаються розрахункові значення параметрів навантаження, необхідні для проектування будівельних конструкцій. Дані окремих метеостанцій, нанесені на географічну карту, утворюють поверхню, яка описує територіальну мінливість досліджуваного параметра. Цій поверхні властиві випадкові коливання, обумовлені похибками роботи метеостанцій, особливостями мікрорельєфу та мікроклімату місцевості, неспівпадаючими періодами спостережень. Дані різних метеостанцій характеризуються різною точністю і достовірністю внаслідок особливостей розміщення та роботи станцій, різних строків спостережень, а також необхідності відновлення деяких даних непрямыми методами.

Завданням територіального районування навантажень є визначення районних значень розрахункових параметрів та меж територіальних районів таким чином, щоб значення розрахункового параметра для кожної метеостанції найкраще відповідали встановленим районним значенням. Карта районування, точно побудована за випадковими даними, матиме надто складний, несистематичний вигляд і не відображатиме об'єктивних закономірностей територіальної мінливості досліджуваного параметра. Для розробки практично корисної карти районування необхідно згладити наявні значення розрахункових параметрів. Це приведе до того, що деякі метеостанції можуть потрапити до "чужих" районів, але в карті будуть виявлені та враховані загальні закономірності територіальної мінливості досліджуваного навантаження.

При визначенні меж територіальних районів за згладженими даними можуть знайтися метеостанції чи місцевості, для яких значення досліджуваного параметра:

- а) перевищує встановлене районне значення (імовірність цієї події позначимо через P_1);
- б) знаходиться в межах районного значення (імовірність P_2);
- в) може бути віднесене до попереднього району (імовірність позначена через P_3).

Випадок "а" відповідає місцевостям, для яких карта районування виконана не в запас надійності, а у випадку "в" карта має надто великі запаси. Тому імовірності P_3 і, особливо, P_1 повинні бути невеликими. Це можна реалізувати за рахунок вибору достатньо великого кроку градації районних значень, який перекриє випадкові флуктуації поля розрахункового параметра, та розробки карти районування з урахуванням верхньої межі цього поля.

Сформульовані принципи реалізовані в методиці територіального районування розрахункових параметрів атмосферних навантажень, яка викладена в [39]. Територіальна мінливість досліджуваного параметра описується імовірнісною моделлю нестационарного нормального випадкового поля, ординатами якого є значення досліджуваного параметра для окремих метеостанцій. Математичне сподівання цього поля визначається шляхом згладжування ординат, а стандарт S_0 обчислюється в результаті статистичної обробки залишків від згладжування.

3 метою обґрунтованого вибору кроку градації територіальних районів розглянутий перетин цього поля і встановлені табличні залежності імовірностей P_1 , P_2 і P_3 від кроку градації k та відстані t між математичним сподіванням та верхньою межею випадкового поля розрахункового параметра. Така залежність наведена в таблиці 1.4, де значення k і t виражені в кількостях стандартів S_0 випадкового поля досліджуваного параметра навантаження. Користуючись таблицею 1.4 чи більш детальним її варіантом, можна вибрати найменше значення k і таке t , при яких імовірність P_2 буде досить великою, а імовірності P_1 та P_3 - малими.

Таблиця 1.4

Імовірності попадання метеостанцій в межі районів

t	Імовірності	Крок градації (кількість стандартів k)					
		1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.0	P	0.316	0.286	0.259	0.235	0.214	0.195
	P ₁ ¹	0.369	0.429	0.482	0.530	0.573	0.610
	P ₃ ²	0.316	0.286	0.259	0.235	0.214	0.195
0.2	P	0.251	0.225	0.203	0.183	0.166	0.151
	P ₁ ¹	0.363	0.422	0.475	0.523	0.566	0.603
	P ₃ ²	0.387	0.353	0.322	0.294	0.269	0.246
0.4	P	0.194	0.173	0.154	0.139	0.125	0.114
	P ₁ ¹	0.344	0.402	0.455	0.502	0.545	0.583
	P ₃ ²	0.462	0.425	0.391	0.359	0.330	0.304
0.6	P	0.145	0.129	0.114	0.102	0.092	0.084
	P ₁ ¹	0.316	0.371	0.422	0.469	0.512	0.550
	P ₃ ²	0.538	0.500	0.463	0.428	0.396	0.366
0.8	P	0.106	0.093	0.082	0.073	0.066	0.060
	P ₁ ¹	0.281	0.332	0.381	0.427	0.469	0.508
	P ₃ ²	0.613	0.575	0.537	0.500	0.465	0.432
1.0	P	0.075	0.065	0.058	0.051	0.046	0.041
	P ₁ ¹	0.241	0.288	0.333	0.377	0.419	0.459
	P ₃ ²	0.684	0.647	0.609	0.572	0.535	0.500

Особливу увагу слід звертати на значення P₁, рівне імовірності заниження розрахункових параметрів навантажень у результаті виконаного територіального районування. Імовірності P₁ рекомендується приймати такими, щоб забезпеченості встановлених районних значень були не меншими від забезпеченостей розрахункових значень, обчислених за даними окремих метеостанцій. При територіальному районуванні розрахункових значень вітрового навантаження, обчислених за імовірнісними моделями випадкового процесу та послідовності місячних максимумів слід приймати P₁ < 0.4. При районуванні розрахункових значень снігового навантаження за послідовностями річних максимумів приймається P₁ < 0.3

Математичне сподівання випадкового поля досліджуваного параметра для якої завгодно точки місцевості визначається шляхом згладжування ординат за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^N (Q_i c_i p_i) / \sum_{i=1}^N c_i p_i \quad (1.53)$$

де N - кількість метеостанцій;

Q_i - ордината поля, рівна значенню досліджуваного параметра для i-тої метеостанції;

c_i - вагова функція згладжування;

p_i - вагова функція точності.

Вагова функція згладжування обчислюється за формулою:

$$c_i = \exp(-d_i / a) \quad (1.54)$$

де a - константа, що визначає міру згладжування;

d_i - відстань від точки, для якої обчислюється математичне сподівання, до i-тої метеостанції.

Константа згладжування у формулі (1.54) приймається 0.75 < a < 0.90 середньої відстані між сусідніми метеостанціями. Це дозволяє отримати плавну поверхню математичного сподівання, вільну від випадкових флуктуацій даних окремих метеостанцій, але відображаючу характерні закономірності територіальної мінливості досліджуваного параметра.

Вагова функція точності p_i враховує точність і достовірність визначення досліджуваного параметра за даними i-тої метеостанції. Значення p_i доцільно встановити обернено пропорціональним до стандарту оцінки досліджуваного параметра Q_i, обчисленої за даними цієї метеостанції. У більшості випадків можна прийняти

$$p_i = \sqrt{n_i} \quad (1.55)$$

де n_i - обсяг вибірки даних для i-тої метеостанції.

Згідно з розробленим методом, територіальне районування розрахункових параметрів атмосферних навантажень виконується за допомогою ПЕОМ у такому порядку:

1) дані метеостанцій згладжуються за формулою (1.53) і обчислюється стандарт залишків від згладжування S_0 , після чого вибирається крок градації територіальних районів k і значення t за таблицею 1.4;

2) при тому ж значенні константи згладжування "а" за формулою (1.53) обчислюються математичні сподівання поля розрахункового параметра M в вузлах досить густої регулярної прямокутної сітки;

3) визначається верхня межа поля розрахункового параметра $Q_{max} = M + t \cdot S_0$ та будується гістограма її розподілу, за допомогою якої вибираються районні значення параметра;

4) визначаються межі територіальних районів шляхом інтерполяції значень верхньої межі Q_{max} поля досліджуваного параметра за формулами [19] з використанням чотирьох найближчих вузлів сітки і кресляться на екрані монітора;

5) отримана карта територіального районування редагується (пишуться пояснювальні надписи, при необхідності коригуються межі територіальних районів і т.п.), після чого її можна надрукувати, зберегти в дисковому файлі, а також знову завантажити з диска для аналізу та редагування.

Районні значення розрахункового параметра потрібно встановити такими, щоб надлишкові запаси територіального районування були мінімальними. Для цього використовується гістограма розподілу верхньої межі поля параметра Q_{max} , яка звичайно має складний полімодальний характер. Моді цієї гістограми відповідають значенням досліджуваного параметра, що зустрічаються на великих територіях. Якщо районні значення параметра встановити трохи більшими від виявлених мод, то для значної частини території надлишкові запаси районування будуть мінімальними. Для узгодження з модами гістограми крок градації районних значень можна зробити нерівним.

Описана методика дозволяє складати карти територіального районування розрахункових параметрів атмосферних навантажень з вибором оптимального кроку градації та раціональних районних значень досліджуваного параметра. Вище показано, що граничні розрахункові значення змінних навантажень залежать від строку служби конструкції, а експлуатаційні - від частки строку служби, протягом якої вони можуть перевищуватися. Таким чином, предметом територіального районування атмосферних навантажень є двохпараметрична функція $Q(T)$, параметри якої змінюються залежно від географічного району.

В роботі [37] виконано порівняльний аналіз трьох різних способів територіального районування таких функцій. Найбільш точним та зручним для практичного використання є спосіб, заснований на осередненні функцій $Q(T)$, нормованих шляхом ділення на одне з їх значень, і територіальному районуванні нормуючого параметра. При районуванні граничних розрахункових значень атмосферних навантажень **використовується така процедура:**

- 1) обирається мережа з N рівномірно розташованих на досліджуваній території метеостанцій, для яких наявні досить достовірні метеорологічні дані про навантаження (можуть використовуватися також дані усіх метеостанцій);
- 2) за прийнятою імовірнісною моделлю навантаження та даними кожної з N метеостанцій визначаються залежності розрахункового навантаження $Q_1(T)$ від його періоду повторюваності T для необхідного діапазону значень T ;
- 3) обирається базове значення періоду повторюваності T_0 і кожна з визначених вище залежностей нормується шляхом ділення на розрахункове значення Q_{01} , що відповідає базовому періоду повторюваності, за формулою:

$$Q_{n1}(T) = Q_1(T) / Q_{01}, \quad \text{де } Q_{01} = Q_1(T_0); \quad (1.56)$$

- 4) шляхом осереднення по ансамблю метеостанцій визначається спільна для усієї території нормована залежність розрахункового навантаження від періоду повторюваності:

$$Q_n(T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{n1}(T); \quad (1.57)$$

5) за викладеною вище методикою розробляється карта територіального районування значень Q_{o1} навантаження для базового періоду повторюваності.

Наявність осередненої по території залежності $Q_n(T)$ та карти територіального районування значення Q_o дозволяє визначити розрахункове навантаження для довільного географічного району та строку служби конструкції T за формулою:

$$Q(T) = Q_o Q_n(T), \quad (1.58)$$

де Q_o - значення навантаження, отримане з карти територіального районування для заданого географічного району; $Q_n(T)$ - загальна для усієї території залежність, яка може бути задана аналітично, таблично чи графічно.

Територіальне районування експлуатаційних розрахункових значень атмосферних навантажень виконується за тією ж методикою. Оскільки вихідними є залежності $Q(\mu)$ розрахункового значення від частки строку служби μ , протягом якої воно може перевищуватися, замість базового періоду повторюваності T_o враховується базове значення μ_o .

Важливим аспектом розробленого способу територіального районування є правильний вибір нормуючого параметра, тобто базового періоду повторюваності T_o чи базового значення μ_o . Вони вибрані на прикладі реальних метеорологічних даних з умови мінімізації похибок територіального районування розрахункових значень атмосферних навантажень. В результаті аналізу відхилень нормованих кривих для окремих метеостанцій $Q_{n1}(T)$ від осередненої кривої $Q_n(T)$ при $5 < T < 200$ років базовий період повторюваності прийнято рівним $T_o = 40$ років. Аналіз відхилень нормованих залежностей $Q_{n1}(\mu)$ від осередненої кривої $Q_n(\mu)$ при $0.0001 < \mu < 0.01$ привів до базового значення $\mu_o = 0.01$. Саме такі значення використовуються в формулах (1.56) та (1.58) при нормуванні снігового та вітрового навантажень.

Запропоновану методику територіального районування проілюструємо простим для сприйняття прикладом. Розглянемо середньорічні товщини снігового покриву в полосі шириною близько 40 кілометрів, яка проходить з півночі на південь України від Семенівки Сумської області до Херсону. Завдяки порівняно невеликій ширині полоси можна вважати, що усі пункти спостереження розміщені на одній прямій лінії і їх дані утворюють перетин випадкового поля висоти снігового покриву, зображений на рисунку 1.4.

За формулою (1.43) обчислені залежності $H_1(T)$ при періодах повторюваності $5 < T < 200$ років та забезпеченості $P = 0.368$. Отримані криві знормовані за формулою (1.56) при базовому періоді повторюваності $T_o = 40$ років та осереднені за формулою (1.57). Середня залежність $H_n(T)$ наведена на рисунку 1.5, де показані також нормовані залежності $H_{n1}(T)$ для двох метеостанцій, що дають найбільші відхилення від середнього. З малюнка видно, що при $T_o = 40$ років усі функції перетинаються в одній точці, а найбільші відхилення від середньої кривої спостерігаються при граничних значеннях строку служби і мають протилежні знаки. Показана на рисунку 1.5 нормована середня залежність розрахункової товщини снігового покриву від періоду повторюваності досить точно апроксимується аналітичним виразом:

$$H_n(T) = A + B \ln(T) = 0.322 + 0.183 \ln(T). \quad (1.59)$$

Схема територіального районування розрахункової товщини снігового покриву $H_o = H_1(T_o)$ при базовому періоді повторюваності $T_o = 40$ років наведена на рисунку 1.4. Товщина снігового покриву зменшується з півночі на південь України, маючи при цьому виразне "плато" в районі Дніпра, а також значні випадкові коливання. Дані метеостанцій згладжені за формулою (1.53) при $a = 50$ км; стандарт залишків від згладжування дорівнює $S_o = 48.7$ мм. За таблицею 1.4 визначено $t = 0.6 \times S_o = 29$ мм та крок градації $k = 1.8 \times S_o = 88$ мм. На рисунку зображена отримана функція математичного сподівання M та верхня межа поля $H_{max} = M + 29$ мм, яка й використо-

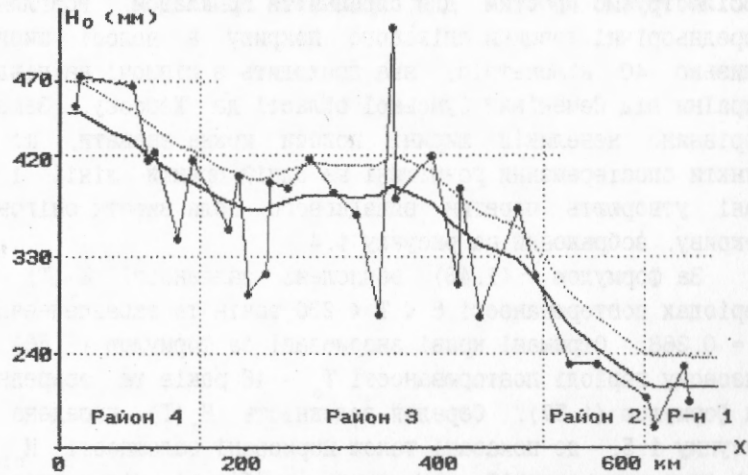


Рис. 1.4 Схема територіального районування розрахункової товщини снігового покриву H_0 при $T=40$ років

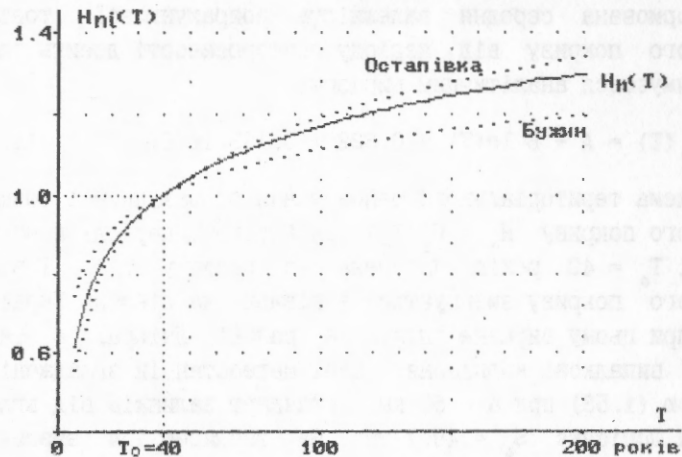


Рис. 1.5 Нормовані залежності розрахункової товщини снігового покриву від періоду повторюваності

вується для розмежування територіальних районів. Виходячи з виявленого кроку градації та вигляду функції математичного сподівання, встановлено чотири райони з районними значеннями товщини снігового покриву: $H_{01} = 240$ мм, $H_{02} = 330$ мм, $H_{03} = 420$ мм, $H_{04} = 470$ мм, які й показані на рисунку 1.4.

З рисунка видно, що лише в одному випадку значення товщини снігового покриву H_{01} для окремої метеостанції суттєво перевищує районне значення $H_{03} = 420$ мм. Різка відмінність цього значення від даних сусідніх метеостанцій наводить на думку про похибки в метеорологічних даних, за якими воно обчислене. Таким чином, запропонована процедура згладжування дозволяє відсіяти явно аномальні дані, забезпечуючи тим самим виявлення загальних закономірностей територіальної мінливості атмосферних навантажень.

Отримані результати дозволяють, скориставшись формулою (1.58), визначити розрахункове значення товщини снігового покриву для довільного географічного району та заданого періоду повторюваності. Величина H_0 визначається за рисунком 1.4, а значення $H_n(T)$ - за формулою (1.59) чи рисунком 1.5.

Розділ 2. НОРМУВАННЯ СНІГОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

2.1. Метеорологічні дані, передумови та імовірнісні моделі, використані при нормуванні снігового навантаження

На території України працюють близько 200 метеостанцій та 450 метеопостів, що належать до системи Держкомгідромету і ведуть спостереження за сніговим покривом за методикою, регламентованою [26]. Найбільш достовірні результати дають снігомірні зйомки, які проводяться один раз у п'ять діб на відкритій (у полі) або захищеній від дії вітру (галявина в лісі, ліс під кронами дерев) площадці. На деяких метеостанціях проводяться одночасні вимірювання на двох або трьох площадках. Результатом кожної снігозйомки є середні по площадці значення висоти, густини та запасу води в сніговому покриві. Запас води, виражений в міліметрах, чисельно дорівнює вазі снігового покриву на поверхні землі в кг/м^2 . Результати снігомірних зйомок, опубліковані в метеорологічних щорічниках та щомісячниках, дозволяють використовувати досить повні дані, починаючи з 1945 року.

Аналіз наявних даних показує, що переважна більшість пунктів спостереження розташовані в рівнинній місцевості і виконують снігозйомки на відкритій площадці. Таке розташування відображає географічні умови, характерні для території України, і вказує на необхідність нормувати снігове навантаження для відкритої рівнинної місцевості, а не для захищеної від дії вітру, як це зроблено в СНиП 2.01.07-85* [58].

Зв'язок між значеннями снігового навантаження на відкритій та захищеній від дії вітру площадках досліджено за даними 40 метеостанцій та постів, на яких виконувалися снігозйомки одночасно на двох площадках. У першому наближенні залежність граничного розрахункового значення снігового навантаження на площадці, захищеній від дії вітру, Q_3 від

відповідного значення для відкритої площадки Q_B може бути описана формулою:

$$Q_3 = 1.1 Q_B . \quad (2.1)$$

Аналогічні дослідження виконувалися також авторами [17], які наводять формули, близькі до (2.1).

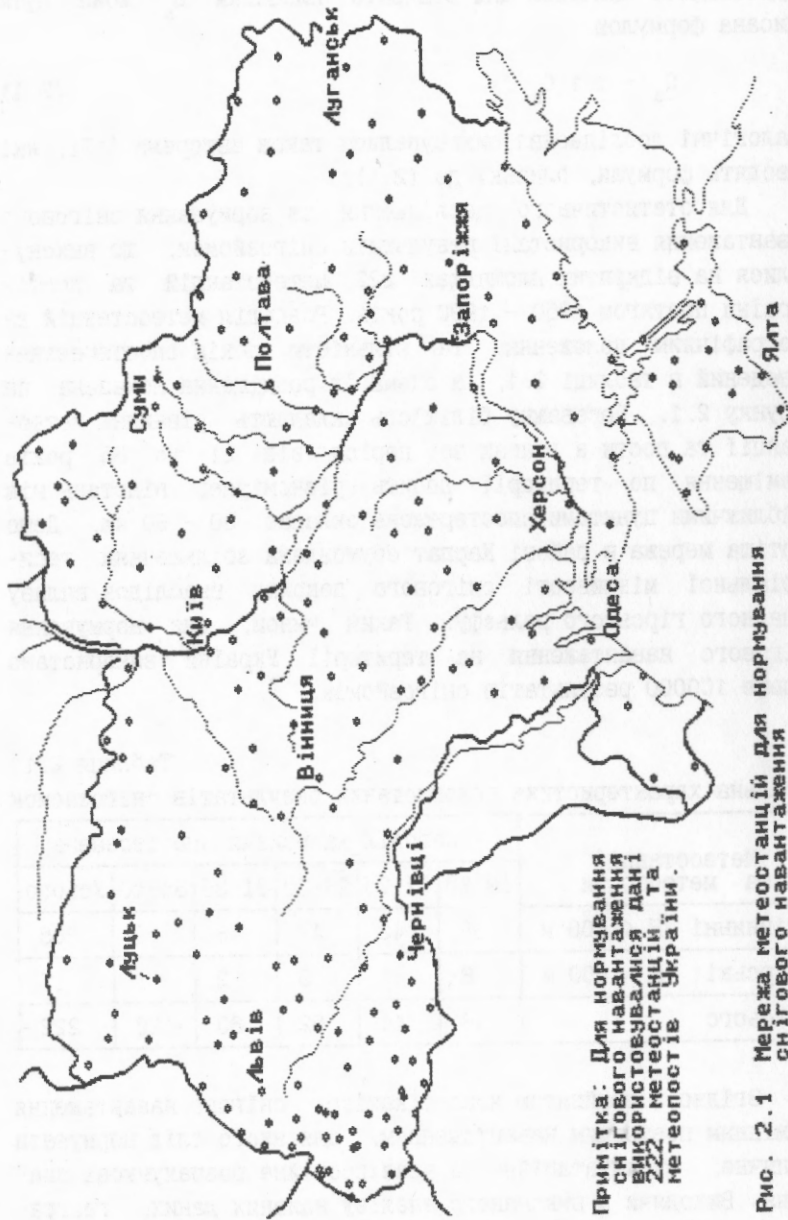
Для статистичного дослідження та нормування снігового навантаження використані результати снігозйомок, що виконувалися на відкритих площадках 222 метеостанцій та постів України протягом 1950 - 1990 років. Розподіл метеостанцій за географічним положенням та кількістю років спостереження наведений в таблиці 2.1, а схема їх розміщення показана на рисунку 2.1. Переважно більшість складають рівнинні метеостанції та пости з даними за період від 21 до 35 років. Розміщення по території досить рівномірне; відстань між найближчими пунктами спостережень складає 30 - 60 км. Дещо гущіша мережа в районі Карпат обумовлена збільшенням територіальної мінливості снігового покриву внаслідок впливу складного гірського рельєфу. Таким чином, для нормування снігового навантаження на території України використано більше 100000 результатів снігозйомок.

Таблиця 2.1

Загальна характеристика використаних результатів снігозйомок

Метеостанції та метеопости	Розподіл за роками спостережень					
	10-20	21-25	26-30	31-35	36-40	Усього
Рівнинні $H < 400$ м	38	43	47	58	19	205
Гірські $H > 400$ м	8	1	5	2	1	17
Усього	46	44	52	60	20	222

Згідно з прийнятою класифікацією, снігове навантаження є змінним повторним навантаженням, для якого слід нормувати граничне, експлуатаційне та квазіпостійне розрахункові значення. Виходячи з виконаного аналізу наявних даних, геогра-



Примітка: Для нормування снігового навантаження використувувалися дані 222 метеостанцій та метеопостів України.

Рис. 2.1 Мережа метеостанцій для нормування снігового навантаження

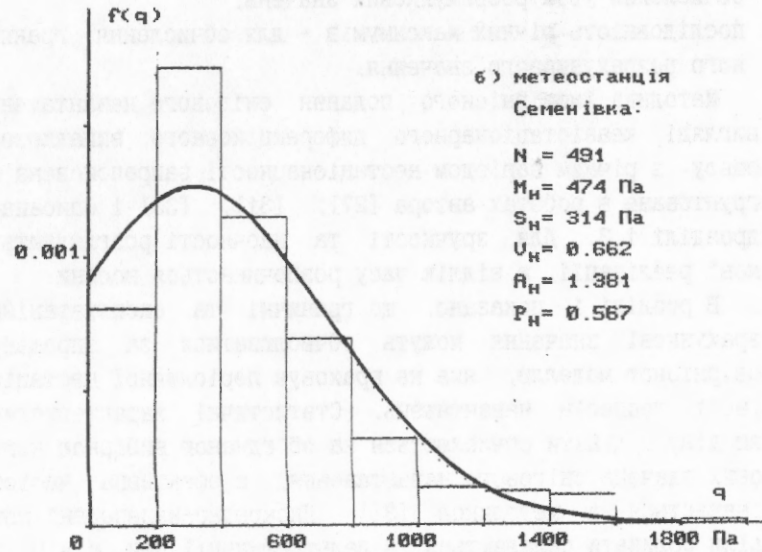
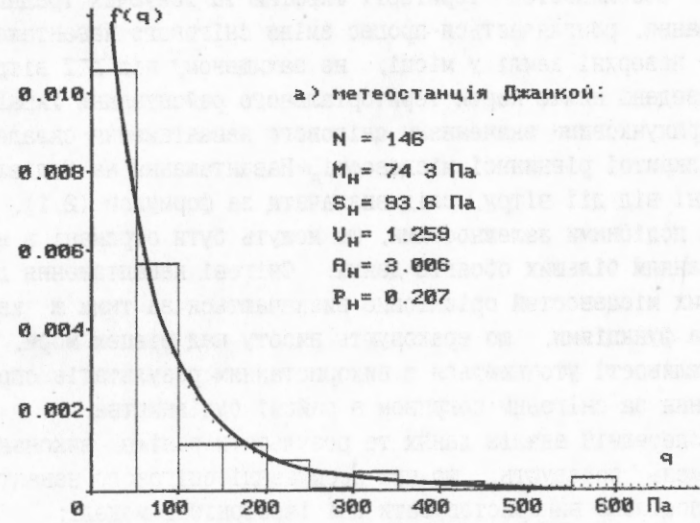


Рис. 2.2 Розподіл ненульових значень ваги снігу

фічних особливостей території України та існуючих традицій нормування, розглядається процес зміни снігового навантаження на поверхні землі у місці, не захищеному від дії вітру. Усі наведені нижче карти територіального районування України за розрахунковими значеннями снігового навантаження складені для відкритої рівнинної місцевості. Навантаження на будівлі, захищені від дії вітру, слід визначати за формулою (2.1), чи іншими подібними залежностями, що можуть бути отримані з використанням більших обсягів даних. Снігові навантаження для гірських місцевостей орієнтовно визначаються за тими ж картами та функціями, що враховують висоту над рівнем моря, а при можливості уточнюються з використанням результатів спостереження за сніговим покривом в районі будівництва.

Попередній аналіз даних та результати раніше виконаних досліджень показують, що при нормуванні снігового навантаження доцільно використовувати дві імовірнісні моделі:

- 1) квазістаціонарний диференційовний випадковий процес - для обчислення усіх розрахункових значень;
- 2) послідовність річних максимумів - для обчислення граничного розрахункового значення.

Методика імовірнісного подання снігового навантаження у вигляді квазістаціонарного диференційовного випадкового процесу з річним періодом нестационарності запропонована та обґрунтована в роботах автора [27], [31], [33] і описана в підрозділі 1.3. Для зручності та наочності розглядаються зимові реалізації, а відлік часу розпочинається восени.

В розділі 1 показано, що граничні та експлуатаційні розрахункові значення можуть обчислюватися за спрощеною імовірнісною моделлю, яка не враховує періодичної нестационарності процесів навантажень. Статистичні характеристики розподілу ординати обчислюються за об'єднаною вибіркою ненульових значень снігового навантаження, а ефективна частота визначається за методикою [31]. Дискретно-неперервні розподіли ординати складаються з дельта-функції при $q = 0$ та розподілу ненульових даних, який апроксимується поліномо-

експоненціальним законом. Тоді густина розподілу при $q > 0$ може бути записана у вигляді

$$f(q) = P_H \cdot \exp(C_0 + C_1 \cdot q + C_2 \cdot q^2 + C_3 \cdot q^3), \quad (2.2)$$

де P_H - частота ненульових значень снігового навантаження; $C_0 \dots C_3$ - параметри, які визначаються через математичне сподівання M_H , стандарт S_H і коефіцієнт асиметрії A_H вибірки ненульових даних за методикою, описаною в розділі 1.

Приклади густин розподілу ненульових значень снігового навантаження наведені на рисунку 2.2. Для малосніжних південних районів України характерні експонентоподібні розподіли ненульових значень ваги снігового покриву, а для північних районів зі стійким сніговим покривом ці розподіли звичайно мають асиметричну одномодальну форму.

Послідовності річних максимумів снігового навантаження сформовані з тих же даних, що й проаналізовані вище зимові реалізації випадкового процесу ваги снігового покриву. Вони описуються розподілом Гумбеля (1.20), параметри якого α і β обчислюються за формулами (1.25).

Порівняльний аналіз описаних імовірнісних моделей снігового навантаження виконано шляхом співставлення розрахункових значень та точності їх обчислення. Для нормування граничних розрахункових значень доцільно використовувати імовірнісну модель послідовності річних максимумів ваги снігового покриву. Вона спрощує розрахункову процедуру, забезпечує нормування в запас надійності, а також дає найменші похибки розрахункових навантажень. Експлуатаційні розрахункові значення снігового навантаження обчислюються за розподілом ненульових даних (2.2), а для нормування квазіпостійних розрахункових значень слід використовувати імовірнісну модель квазістаціонарного випадкового процесу.

2.2. Граничні розрахункові значення снігового навантаження

Згідно з висновками попереднього підрозділу, для обчислення граничних розрахункових значень снігового навантаження використані послідовності річних максимумів ваги снігового покриву на 222 метеостанціях та метеопостах, зображених на рисунку 2.1. Для кожного пункту спостереження розрахункові значення $Q_m(T)$ отримані за формулою (1.43) при встановлених строках служби конструкцій T в межах від 5 до 200 років та забезпеченостях, визначених за формулою (1.4). Оцінка за (1.50) показала, що при обсягах вибірок від 20 до 40 річних максимумів випадкові похибки обчислення розрахункового навантаження не перевищують 20%.

Отримані результати свідчать про значну територіальну мінливість снігового навантаження. Розрахункові значення $Q_m(40)$ для базового строку служби конструкцій $T = 40$ років змінюються від 0.7 кПа в Херсонській області та в Криму до 2.3 кПа в північносхідних регіонах України. Звертають на себе увагу досить великі (1.2 - 1.8 кПа) розрахункові значення снігового навантаження на деяких південних метеостанціях. Аналіз наявних даних показав, що на території України інколи бувають надзвичайно сніжні зими, коли вага снігового покриву може перевищувати 2 кН/м^2 . Як приклад, можна навести зими 1963-64, 1966-67 та 1986-87 років. Наявність декількох значень, набагато більших від звичайної для південних районів ваги снігового покриву, приводить до зростання коефіцієнтів варіації вибірок річних максимумів та відповідного збільшення розрахункових значень снігового навантаження.

Найбільші значення снігового навантаження, що помітно виділяються з загальної картини, отримані для високогірних метеостанцій. Ця відмінність поряд з існуванням залежності снігового навантаження від висоти над рівнем моря [14], [29] приводить до необхідності територіального районування розрахункових значень для рівнинної місцевості. В гірських районах Карпат та Криму великі значення снігового навантаження

отримані також для деяких метеостанцій, розташованих на невеликих висотах над рівнем моря. Це можна пояснити як особливостями клімату гірських районів, так і збільшеними відкладеннями снігу в долинах, захищених від дії вітру оточуваними їх гірськими масивами.

Територіальне районування України виконане за методикою, викладеною в підрозділі 1.5. Граничні розрахункові значення снігового навантаження $Q_0 = Q_m(40)$ обчислювалися при базовому строку служби конструкцій $T = 40$ років за даними 205 рівнинних метеостанцій, де виконувалися снігозйомки на відкритих площадках. При відстанях між найближчими метеостанціями, рівними 30 - 60 км, константа згладжування випадкового поля снігового навантаження дорівнює $a = 30$ км. За таблицю 1.4 прийнято $t = 0.2$ і $k = 1.6$, що дає імовірності попадання до районів: $P_1 = 0.183$, $P_2 = 0.523$, $P_3 = 0.294$. Стандарт залишків від згладжування випадкового поля Q_0 дорівнює 0.19 кПа; при цьому крок градації територіальних районів слід прийняти близьким до 0.3 кПа. При розмахові верхньої межі поля навантаження від 0.68 кПа до 2.18 кПа на карті виділено шість територіальних районів з районними значеннями: $Q_0 = 0.8, 1.0, 1.3, 1.6, 1.9$ і 2.2 кПа.

Карта територіального районування України за розрахунковими значеннями снігового навантаження $Q_0 = Q_m(40)$ для базового строку служби $T = 40$ років наведена на рисунку 2.3. Запаси районування, закладені в розроблену карту, проаналізовані шляхом порівняння фактичних значень $Q_m(40)$ для кожної метеостанції з відповідними районними значеннями. Перевищення встановлених картою районних значень фактичними розрахунковими навантаженнями виявлено для 21% метеостанцій, що узгоджується з рекомендованою в підрозділі 1.5 імовірністю $P_1 < 0.3$. На рисунку 2.4 зображений розподіл запасів районування $D = (Q_0 - Q_m) / Q_m \times 100\%$. Внаслідок неминучих узагальнень розрахункове навантаження Q_0 збільшилося в середньому на 16.4%. Заниження районних розрахункових значень порівняно з фактичними звичайно не перевищують 12%, а завищення можуть

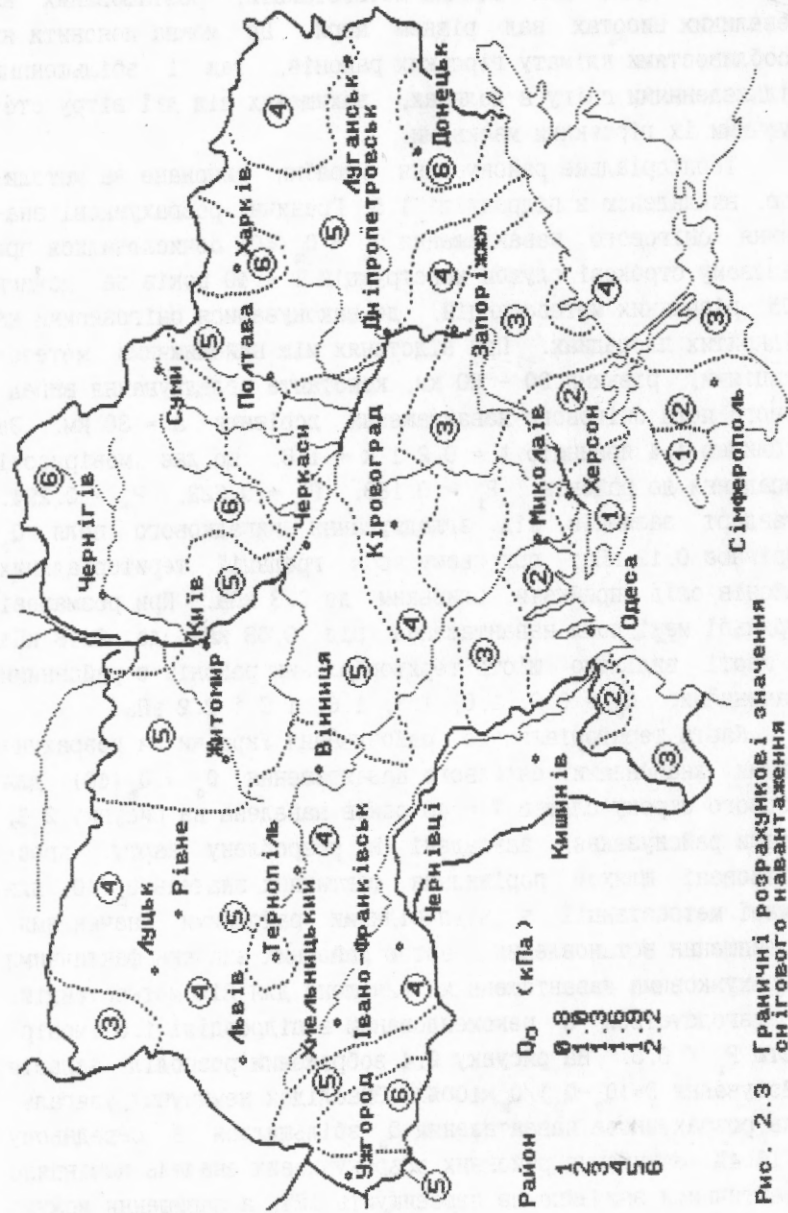


Рис. 2.3 Граничні розрахункові значення снігового навантаження

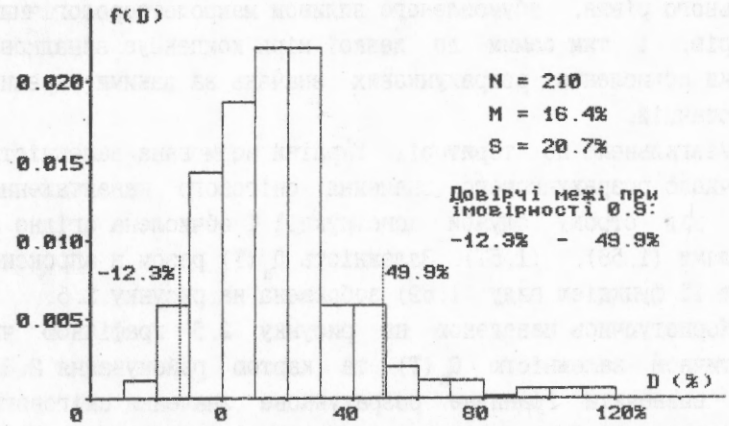


Рис. 2.4 Розподіл запасів територіального районування розрахункового снігового навантаження Q_0

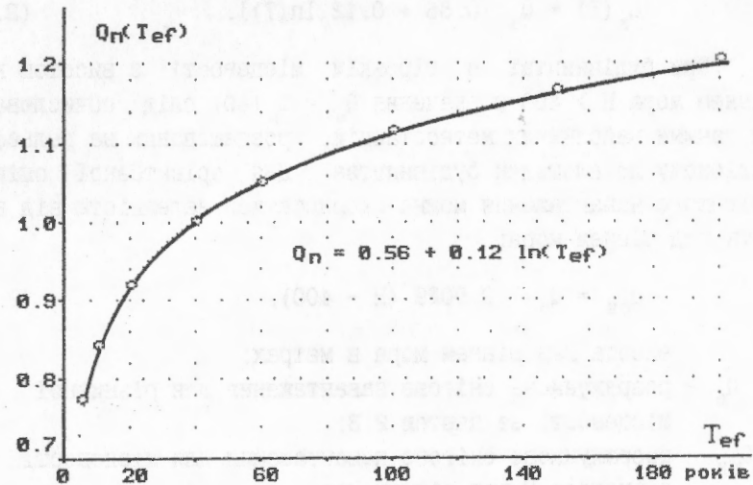


Рис. 2.5 Нормована залежність граничного розрахункового навантаження від строку служби конструкції

досягати 50%. Такі відхилення є природним результатом процедури згладжування, яка наближає дані окремих метеостанцій до загального рівня, обумовленого впливом макрометеорологічних факторів, і тим самим до деякої міри компенсує випадкові похибки обчислення розрахункових значень за даними окремих метеостанцій.

Узагальнена по території України нормована залежність граничного розрахункового значення снігового навантаження $Q_n(T)$ від строку служби конструкції T обчислена згідно з формулами (1.56), (1.57). Залежність $Q_n(T)$ разом з апроксимуючою її функцією виду (1.59) зображена на рисунку 2.5.

Користуючись наведеною на рисунку 2.5 графічною чи аналітичною залежністю $Q_n(T)$ та картою районування 2.3, можна визначити граничне розрахункове значення снігового навантаження на будівлю, розташовану в довільному географічному районі України на висоті до 400 м над рівнем моря і не захищену від дії вітру:

$$Q_m(T) = Q_0 [0.56 + 0.12 \ln(T)]. \quad (2.3)$$

При будівництві в гірській місцевості з висотою над рівнем моря $H > 400$ м значення $Q_0 = Q_m(40)$ слід обчислювати за даними найближчих метеостанцій, розташованих на рельєфі, подібному до площадки будівництва. Для орієнтовної оцінки снігового навантаження можна скористатися залежністю від висоти над рівнем моря:

$$Q_{0H} = Q_0 + 0.0029 (H - 400), \quad (2.4)$$

де H - висота над рівнем моря в метрах;

Q_0 - розрахункове снігове навантаження для рівнинної місцевості за картою 2.3;

Q_{0H} - розрахункове снігове навантаження для місцевості з висотою H над рівнем моря.

Аналогічна залежність, встановлена за дещо більшим обсягом даних, рекомендується авторами [17].

Граничні розрахункові значення снігового навантаження $Q_m(T)$, обчислені за формулою (2.3) та картою районування 2.3, порівняні з розрахунковими сніговими навантаженнями за СНиП 2.01.07-85 [58]. У середньому по Україні при строках служби конструкцій від 5 до 200 років розрахункові значення снігового навантаження слід збільшити в 1.3-2.1 рази, а для деяких регіонів - у 2.8 рази. Таке збільшення розрахункових значень снігового навантаження необхідне для забезпечення достатнього рівня надійності несучих конструкцій і цілком узгоджується з висновками численних публікацій [14], [18] та інших де виявляються недоліки чинних норм снігових навантажень та згадуються аварії покриттів внаслідок дії понаднормативних снігових навантажень в південних районах України.

Існує також думка [56], що для забезпечення надійної експлуатації деяких особливо відповідальних об'єктів снігове навантаження необхідно встановлювати з набагато більшими забезпеченостями та періодами повторюваності.

2.3. Експлуатаційні розрахункові значення снігового навантаження

Для обчислення експлуатаційних розрахункових навантажень використані розподіли ненульових значень випадкового процесу ваги снігового покриву. Підставивши до загальної формули (1.44) густину розподілу (2.2), отримуємо трансцендентне рівняння, подібне до (1.48):

$$P_H \cdot \left[1 - \int_0^Q \exp(C_0 + C_1 \cdot q + C_2 \cdot q^2 + C_3 \cdot q^3) dq \right] = \mu, \quad (2.5)$$

у якому Q_e - пошукуване експлуатаційне розрахункове значення снігового навантаження;

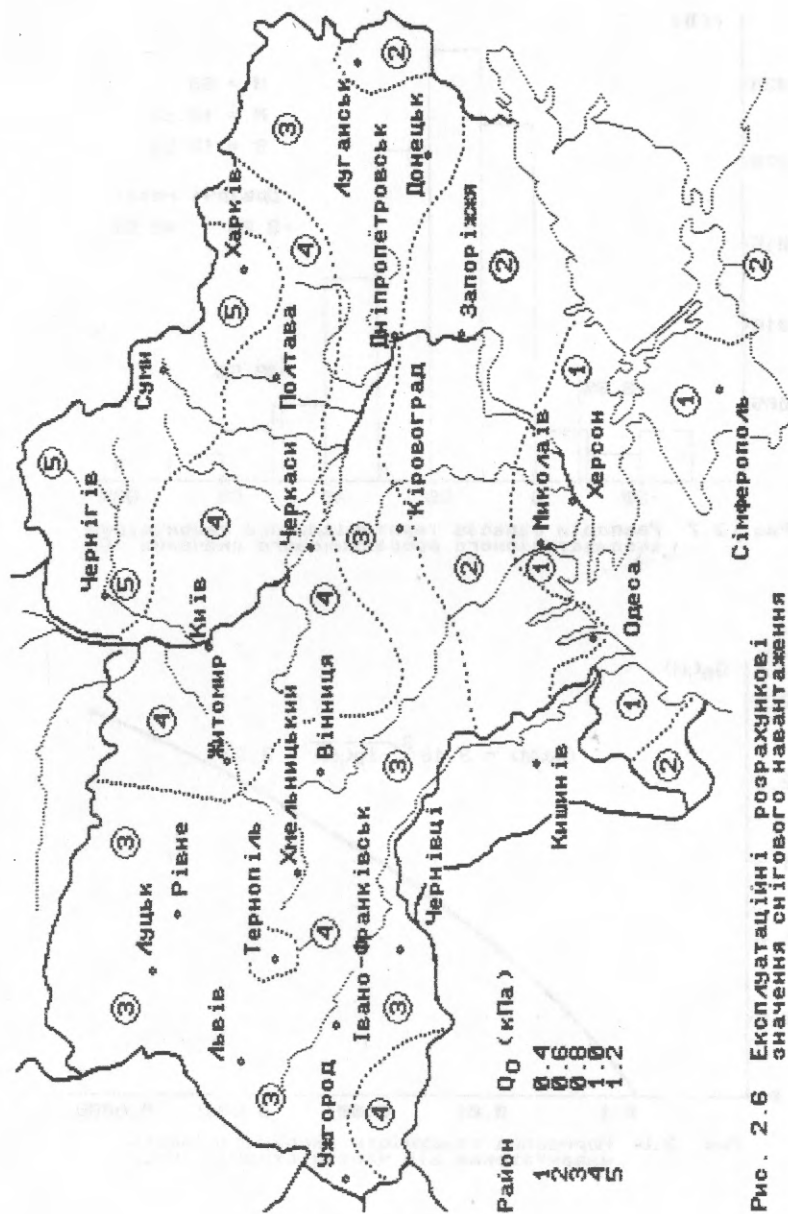
μ - частка строку служби конструкції, протягом якої розрахункове значення Q_e може перевищуватися;

$C_0 \dots C_3$ - параметри поліномо-експоненціального розподілу, визначені через математичне сподівання, стандарт та коефіцієнт асиметрії вибірки ненульових значень снігового навантаження.

За даними обраної метеостанції визначаються параметри $C_0 \dots C_3$, після чого рівняння (2.5) розв'язується числовим методом для ряду значень μ . Отримані результати відображають шукану залежність експлуатаційного розрахункового значення снігового навантаження Q_e від частки строку служби μ для обраного географічного району.

Обчислені за даними 64 українських метеостанцій експлуатаційні розрахункові значення снігового навантаження $Q_e(\mu)$ залежать від географічного району та частки строку служби конструкції μ , протягом якої вони можуть перевищуватися. Найбільші значення $Q_e(\mu)$ отримані для північно-східних регіонів, де часто спостерігаються зими зі стійким сніговим покривом, а найменші - для південних районів, у яких сніг випадає епізодично. Експлуатаційні розрахункові значення $Q_e(0.01)$ співставимі з нормативними сніговими навантаженнями за СНиП 2.01.07-85, змінюючись від 0.14 кПа на метеостанції Джанкой до 1.46 кПа на метеостанції Харків. При дуже малому $\mu = 0.00001$ значення $Q_e(\mu)$ можуть перевищувати 3 кПа.

Подібність залежностей $Q_e(\mu)$ для різних метеостанцій вказує на можливість застосування способу територіального районування, описаного в підрозділі 1.5 і застосованого вище при нормуванні граничних розрахункових значень. Найвища точність нормування досягається при базовому значенні частки строку служби $\mu_0 = 0.01$. Відповідна карта територіального районування України розроблена за даними рівнинних метеостанцій. При наявності рідшої мережі метеостанцій константу згладжування встановлено рівною $a = 50$ км. Стандарт поля $Q_e(0.01)$ дорівнює $S = 7.4$ Па, а крок градації територіальних районів прийнято рівним $k = 2.6 \times S = 20$ Па. Виходячи з розмаху верхньої межі поля $Q_e(0.01)$, встановлено п'ять районів з районними значеннями $Q_0 = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ кПа.



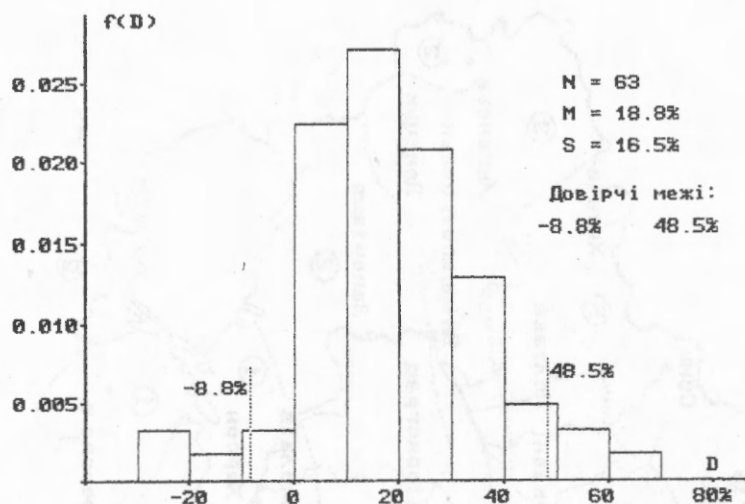


Рис. 2.7 Розподіл запасів територіального районування експлуатаційного розрахункового значення Q_0

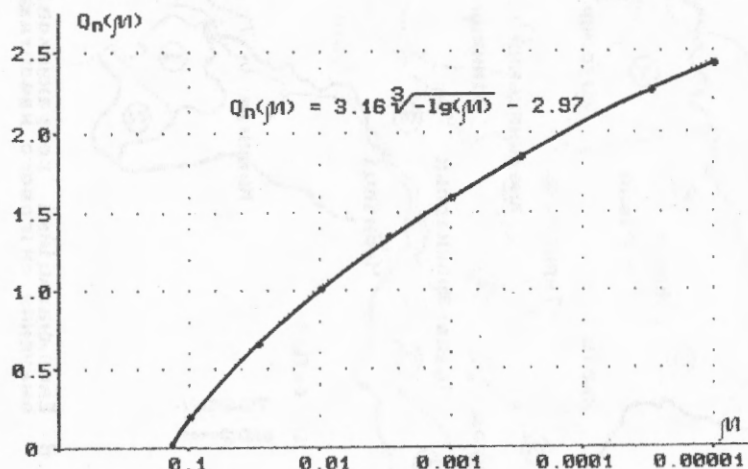


Рис. 2.8 Нормована залежність експлуатаційного навантаження від частки строку служби

Карта територіального районування України за експлуатаційними розрахунковими значеннями снігового навантаження $Q_0 = Q_e(0.01)$ що можуть перевищуватися протягом 1% строку служби конструкцій, наведена на рисунку 2.6. Районовані значення досить монотонно зростають з півдня на північний схід України. Обриси територіальних районів загалом нагадують карту районування за граничними розрахунковими значеннями, показану на рисунку 2.3. 8% метеостанцій мають значення $Q_e(0.01) > Q_0$. З наведеної на рисунку 2.7 гістограми розподілу відсотків відхилень районних значень Q_0 від фактичних $Q_e(0.01)$ видно, що внаслідок територіального районування експлуатаційне розрахункове значення снігового навантаження в середньому по Україні збільшилося на 18.8%. Для окремих районів може спостерігатися зниження розрахункових значень на 8.8% чи їх завищення на 48.5%.

Середня для України нормована залежність експлуатаційного розрахункового значення снігового навантаження $Q_n(\mu)$ від частки строку служби μ , протягом якої вона може перевищуватися, отримана за формулами (1.56) та (1.57) при $\mu_0 = 0.01$. З рисунка 2.8 видно, що при $\mu > 0.1$ вказана залежність досить точно апроксимується наведеним на ньому аналітичним виразом.

Розроблена карта територіального районування та залежність з рисунка 2.8 дозволяють визначати експлуатаційні розрахункові значення снігового навантаження на будівлі за формулою:

$$Q_e = Q_0 \cdot \left[3.16 \sqrt[3]{-lg(\mu)} - 2.97 \right], \quad (2.6)$$

де частка строку служби, протягом якої розрахункове значення Q_e може перевищуватися, визначається величиною μ , а взяте з карти 2.6 значення $Q_0 = Q_e(0.01)$ враховує географічний район України, у якому розміщено будівельний об'єкт.

2.4. Квазіпостійні розрахункові значення снігового навантаження

Квазіпостійне розрахункове значення змінного навантаження Q_p використовується при урахуванні довготривалих реологічних процесів і згідно з [13] повинно визначатися як еквівалентне за впливом на конструкцію до реального процесу навантаження. Найпоширенішим реологічним ефектом, який часто враховується при розрахунках будівельних конструкцій, є повзучість бетону під дією навантаження.

Методика визначення деформацій пружно-повзучого тіла при дії постійних та змінних навантажень розроблена в монографіях [3], [66]. Виключивши з наведених формул складові, що визначають пружні деформації бетону, урахувавши прийняту в теорії старіння гіпотезу про паралельність кривих повзучості та просумувавши ефекти від усіх напружень, що діяли протягом строку служби, отримуємо формулу для визначення сумарної деформації повзучості, викликані дією на бетон випадкового процесу напружень $\sigma(\tau)$ протягом часу t :

$$\varepsilon_p(t) = b C(\infty) \int_0^{t+t_0} \sigma(\tau) \exp(-b\tau) d\tau, \quad (2.7)$$

де $\sigma(\tau)$ - процес зміни напружень в бетоні;

$C(\infty)$ - гранична міра повзучості, яка залежить від виду та умов виготовлення бетону;

t_0 - час початку дії навантаження (вік бетону в момент завантаження);

$b = 0.04$ 1/добу - встановлений за дослідними даними параметр, який характеризує швидкість затухання деформації повзучості [66].

Прирівнюючи обчислену за формулою (2.8) деформацію від дії випадкового процесу навантаження $q(\tau)$ при $t = \infty$ до деформації від дії квазіпостійного розрахункового значення $Q_p = \text{const}$, отримуємо рівняння, розв'язок якого має вигляд

$$Q_p = b \int_0^{t_0+\infty} q(\tau) \exp(-b\tau) d\tau. \quad (2.8)$$

При детермінованій функції навантаження $q(\tau)$ квазіпостійне розрахункове значення Q_p безпосередньо визначається за наведеною формулою. Якщо навантаження $q(\tau)$ є випадковим процесом, результат інтегрування (2.8) - випадкова величина з математичним сподіванням M_p та дисперсією D_p . Враховуючи нормалізуючий вплив операції інтегрування, закон розподілу цієї величини можна вважати близьким до нормального. Тоді квазіпостійне розрахункове значення змінного навантаження дорівнює квантилю нормального розподілу, що відповідає за безпеченості P :

$$Q_p = M_p + t_p \sqrt{D_p}. \quad (2.9)$$

де t_p - квантиль нормованого нормального розподілу, який визначає необхідну забезпеченість розрахункового значення Q_p .

За результатами досліджень [27], [31], кореляційну функцію квазістаціонарного випадкового процесу снігового навантаження можна подати у вигляді добутку незмінної протягом року нормованої кореляційної функції $R_q(\tau_1) = \exp(-\alpha\tau_1)$ та дисперсії $D_q(\tau)$. Виходячи з цієї особливості та відомих правил інтегрування випадкових процесів [55], з формули (2.8) отримані вирази для математичного сподівання і дисперсії значення Q_p :

$$M_p = b \int_{t_0}^{t_0+\infty} M_q(\tau) \exp(-b\tau) d\tau; \quad (2.10)$$

$$D_p = \frac{2 b^2}{\alpha} \int_{t_0}^{t_0+\infty} D_q(\tau) \exp(-2b\tau) d\tau. \quad (2.11)$$

де $M_q(\tau)$ і $D_q(\tau)$ - функції математичного сподівання та дисперсії квазістаціонарного випадкового процесу снігового навантаження;

α - параметр нормованої кореляційної функції.

Обґрунтоване в [112] подання функцій $M_q(\tau)$ і $D_q(\tau)$ у вигляді алгебраїчних поліномів третього ступеня дозволяє отримати аналітичні рішення для інтегралів (2.10) і (2.11), але вони будуть надто громіздкими та неточними внаслідок похибок апроксимації. Тому в подальших розрахунках інтеграли обчислюються способом трапецій з використанням таблично заданих функцій $M_q(\tau)$ і $D_q(\tau)$, отриманих у результаті статистичної обробки метеорологічних даних. На ряді прикладів встановлено, що цілком задовільна точність визначення Q_p досягається при верхній межі інтегрування в формулах (2.10) і (2.11), рівній $t_0 + 1$ рік. Оскільки необхідна забезпеченість граничних розрахункових значень снігового навантаження не перевищує 0.9, квазіпостійні розрахункові значення за формулою (2.9) також обчислюються для забезпеченості 0.9, тобто при $t_p = 1.28$.

Виражена настанціонарність функцій $M_q(\tau)$ і $D_q(\tau)$ випадкового процесу снігового навантаження, а також досить швидке затухання деформацій повзучості при збільшенні віку бетону приводить до різних результатів обчислення розрахункового навантаження Q_p при різних моментах початку завантаження t_0 . На рисунку 2.9 наведена залежність Q_p від моменту t_0 , обчислена за даними метеостанції Полтава. Співставлення отриманої функції $Q_p(t_0)$ з календарними датами та функцією математичного сподівання снігового навантаження $M_q(t)$ показує, що квазіпостійне розрахункове значення Q_p вирішальним чином залежить від дати початку завантаження бетону. Якщо експлуатація конструкції розпочинається у весняно-літній період, повзучість бетону від дії снігового навантаження практично не реалізується, і квазіпостійне розрахункове значення наближається до нуля. При початку експлуатації в період найбільших снігових навантажень розрахункове значення може досягати $Q_p = 901$ Па.

Оскільки в переважній більшості випадків вік бетону під час першого завантаження снігом невідомий, квазіпостійні розрахункові значення снігового навантаження для кожної метеостанції обчислені у двох варіантах. Перший спосіб зво-

диться до пошуку найнесприятливішого моменту завантаження і обчислення найбільшого можливого розрахункового навантаження Q_{pm} , що відповідає саме цьому часові початку експлуатації конструкції. Такий підхід приводить до надто великих запасів при нормуванні квазіпостійних розрахункових значень снігового навантаження, а тому не може бути рекомендований для практичного застосування.

Другий спосіб обчислення квазіпостійних розрахункових значень снігового навантаження враховує невизначеність часу початку експлуатації конструкції t_0 в межах року на основі формули повної імовірності [8]. Якщо значення Q_{pm} обчислене за формулою (2.9) при встановленій вище забезпеченості 0.9, то повна імовірність його перевищення буде меншою за 0.1 внаслідок малої імовірності початку експлуатації конструкції саме в обраний момент часу. Факт початку експлуатації в момент часу $t_{0.1}$ будемо вважати гіпотезою, імовірність якої дорівнює $\Delta t / 365$ при крокові дискретизації за часом Δt діб. Імовірність P_1 неперевикнення наперед визначеного квазіпостійного значення снігового навантаження Q_p при умові початку експлуатації в момент часу $t_0 = t_{0.1}$ легко визначити через функцію нормального розподілу $\Phi(\cdot)$:

$$P_1 = \Phi \left[\frac{Q_p - M_{p1}}{S_{p1}} \right], \quad (2.12)$$

де M_{p1} та S_{p1} - значення математичного сподівання та стандарту квазіпостійного навантаження, обчислені за формулами (2.10) та (2.11) при $t_0 = t_{0.1}$.

Повна імовірність неперевикнення значення Q_p при невідомому часі початку експлуатації дорівнює:

$$P = \sum_i (P_1 \Delta t / 365) = \frac{\Delta t}{365} \sum_i \Phi \left[\frac{Q_p - M_{p1}}{S_{p1}} \right]. \quad (2.13)$$

Прирівнюючи (2.13) до встановленої забезпеченості розрахункового навантаження, отримуємо трансцендентне рівняння, з якого визначається пошукуване квазіпостійне розрахункове значення снігового навантаження Q_p .

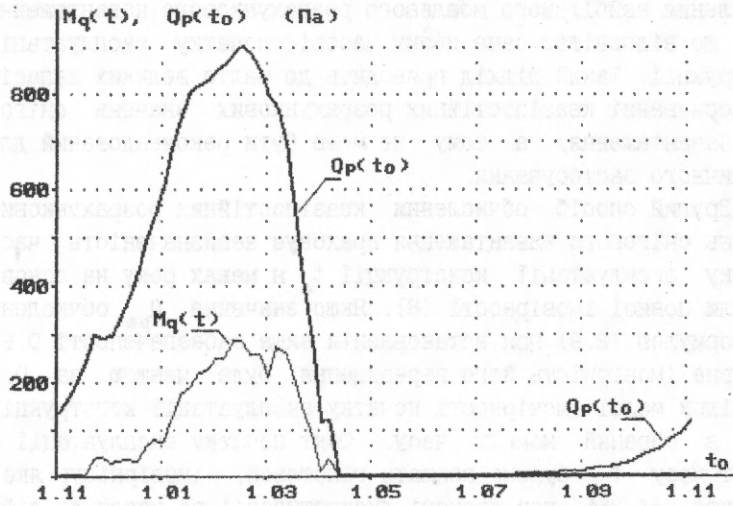


Рис. 2.9 Залежність розрахункового значення Q_p від часу початку навантаження t_0

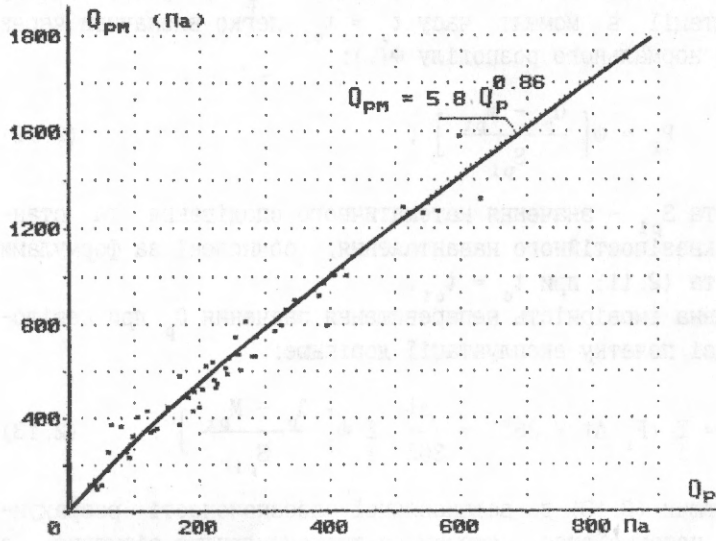


Рис. 2.10 Залежність між розрахунковими Q_p та максимально можливими Q_{pm} квазіпостійними навантаженнями

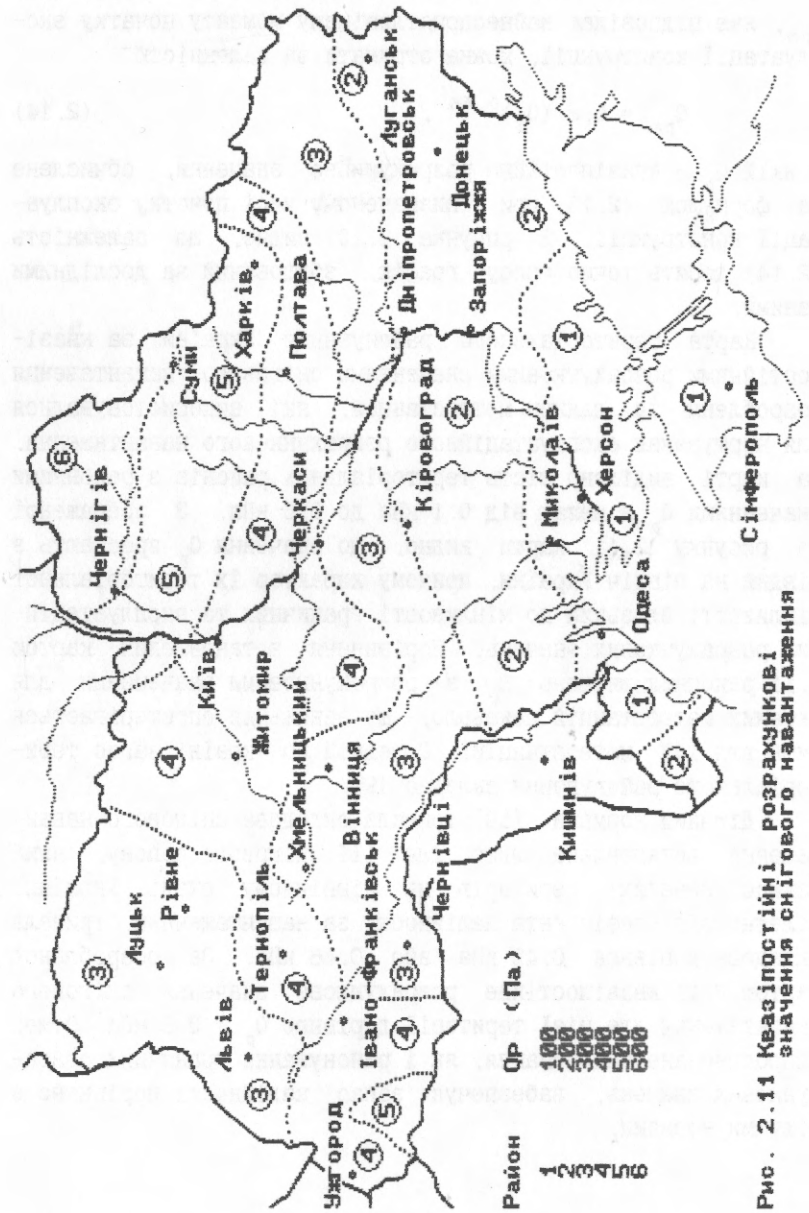


Рис. 2.11 Квазіпостійні розрахункові значення снігового навантаження

Максимально можливе квазіпостійне снігове навантаження Q_{pm} , яке відповідає найнесприятливішому моменту початку експлуатації конструкції, можна отримати за залежністю

$$Q_{pm} = 5.8 (Q_p)^{0.86}, \quad (2.14)$$

у якій Q_p - квазіпостійне розрахункове значення, обчислене за формулою (2.13) при невизначеному часі початку експлуатації конструкції. З рисунка 2.10 видно, що залежність (2.14) досить точно описує графік, збудований за дослідними даними.

Карта територіального районування України за квазіпостійними розрахунковими значеннями снігового навантаження розроблена за даними метеостанцій, які використовувалися для нормування експлуатаційного розрахункового навантаження. На карті виділено шість територіальних районів з районними значеннями Q_p в межах від 0.1 кПа до 0.6 кПа. З зображеної на рисунку 2.11 карти видно, що значення Q_p зростають з півдня на північ України, причому характер їх територіальної мінливості близький до мінливості граничних та експлуатаційних розрахункових значень. Порівняння встановлених картою 2.11 районних значень Q_p з розрахунковими значеннями для окремих метеостанцій показало, що зниження спостерігається лише для 14% метеостанцій. Середній по Україні запас територіального районування складає 49%.

Діючими нормами [58] тривала складова снігового навантаження встановлена лише для III снігового району, який займає невелику територію на північному сході України. Залежно від коефіцієнта надійності за навантаженням, тривала складова дорівнює 0.42 кПа або 0.46 кПа. За розробленою картою 2.11 квазіпостійне розрахункове значення снігового навантаження для цієї території дорівнює $Q_p = 0.6$ кПа. Отже, запропоноване районування, як і районування граничних розрахункових значень, забезпечує запас надійності порівняно з діючими нормами.

2.5. Міжрічна мінливість снігового навантаження

На території України часом спостерігаються надзвичайно сніжні зими, наявність яких спонукала до детального аналізу міжрічної мінливості снігового навантаження з урахуванням частоти та дат виникнення таких зим. Дослідження виконане з використанням досить довгих (1944 - 1990 роки) неперервних послідовностей річних максимумів ваги снігового покриву для розрідженої мережі з 23 українських метеостанцій.

Деякі елементи проаналізованих послідовностей, особливо для південних районів України, в декілька разів перевищують звичайні значення снігового навантаження. З метою аналізу їх належності до загальної сукупності даних сформована об'єднана вибірка нормованих значень річних максимумів ваги снігового покриву. Для цього за даними кожної метеостанції обчислені оцінки математичного сподівання M та стандарту S , а потім виконане нормування усіх даних за формулою

$$q_n = (q_i - M) / S \quad (2.15)$$

Закон розподілу об'єднаної вибірки q_n обсягом 1012 даних в імовірнісній шкалі Гумбеля зображений на рисунку 2.12. Точки з високими значеннями навантаження узгоджуються з прямою, яка описує граничний розподіл Гумбеля при $M = 0$ і $S = 1$. Отже, великі снігові навантаження, які реалізуються під час дуже багатосніжних зим, не випадають з загальної маси даних.

Періодичність виникнення багатосніжних зим та їх локалізація у часі зображені на рисунку 2.13. Кожна з 23 точок відповідає найбільшому за період спостережень значенню річного максимуму ваги снігового покриву на одній з метеостанцій. Вздовж осі абсцис вказані роки, коли спостерігалися найбільші навантаження, а вздовж осі ординат відкладені їх середні періоди повторюваності T_{max} . Для 17 метеостанцій найбільші спостережені значення навантаження мають період повторюваності $T_{max} < 80$ років, що загалом узгоджується з періодом спостереження. Періоди повторюваності найбільших спостережених снігових навантажень на метеостанціях Лозова

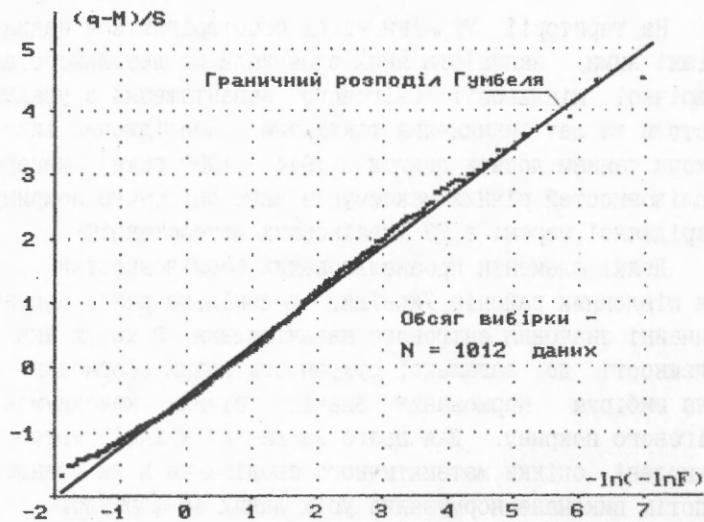


Рис. 2.12 Розподіл об'єднаної вибірки нормованих річних максимумів снігового навантаження

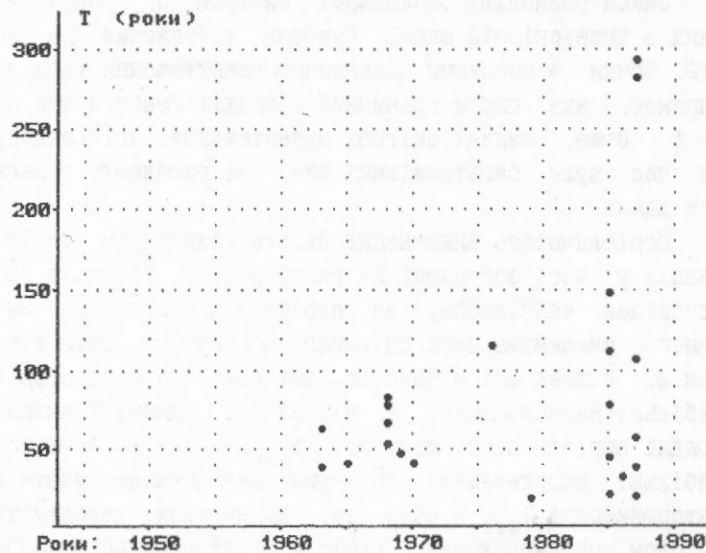


Рис. 2.13 Дати реалізації та періоди повторюваності найбільших значень снігового навантаження

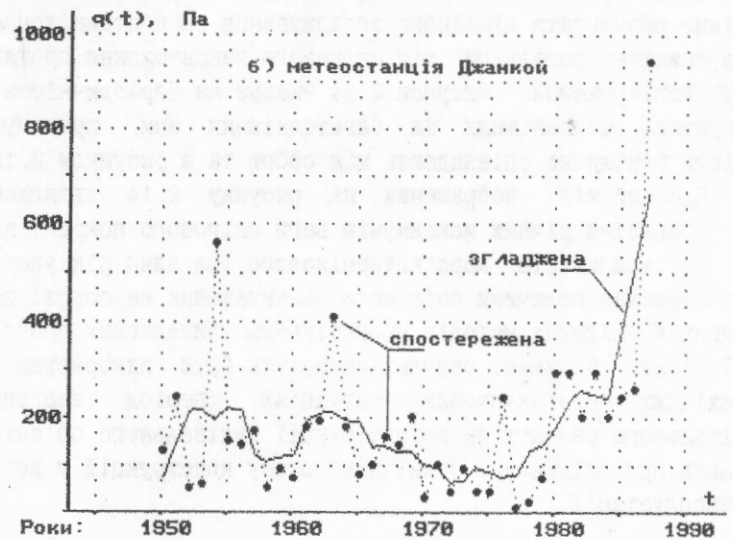
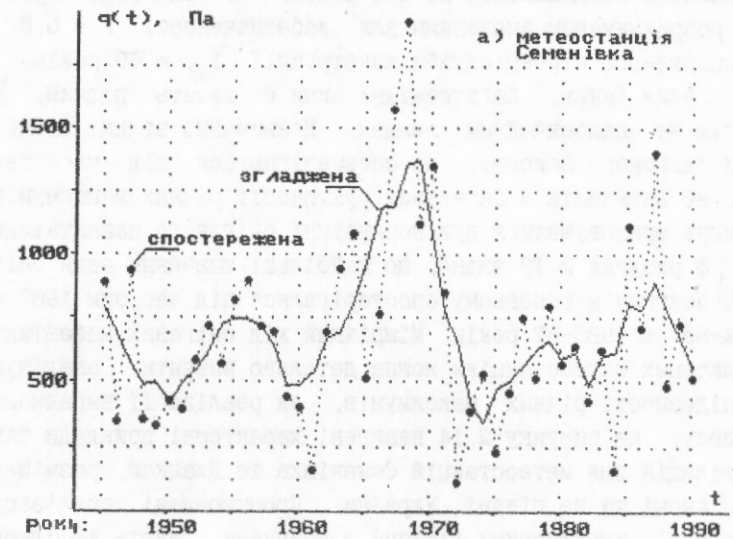


Рис. 2.14 Послідовності річних максимумів снігового навантаження

та Джанкой наближаються до 300 років, що відповідає граничним розрахунковим значенням для забезпеченості $P = 0.8$ та встановленого строку служби конструкції $T_{er} \approx 60$ років.

Таким чином, багатосніжні зими є досить рідким, але зовсім не надзвичайним явищем. Незвичайно великі значення ваги снігового покриву, що спостерігаються під час таких зим, не випадають з загальної сукупності річних максимумів і повинні враховуватися при нормуванні снігового навантаження.

З рисунка 2.13 видно, що найбільші значення ваги снігового покриву в основному спостерігалися під час зим 1967-68, 1984-85 та 1986-87 років. Міжрічний хід снігових навантажень на окремих метеостанціях можна детально вивчити, аналізуючи послідовності річних максимумів, як реалізації випадкового процесу. На рисунку 2.14 наведені характерні приклади таких реалізацій для метеостанцій Семенівка та Джанкой, розміщених на півночі та на півдні України. Спостережені реалізації, зображені пунктирними лініями з крапками, мають випадковий характер і не виявляють видимих закономірностей довготривалої мінливості снігового навантаження. Показані суцільними лініями результати лінійного згладжування за п'ятьма точками відображають загальний хід снігового навантаження протягом часу спостереження. Рисунок 2.14 вказує на періодичність у чергуванні малосніжних та багатосніжних зим, причому ці періоди приблизно співпадають між собою та з рисунком 2.13.

Плавний хід зображених на рисунку 2.14 згладжених послідовностей річних максимумів ваги снігового покриву вказує на можливість короткотермінового (на один рік уперед) прогнозування величини снігового навантаження на основі застосування відомих методів прогнозування випадкових процесів [21], [22]. Отримані результати можуть бути використані у перехідних розрахункових ситуаціях (період зведення, капітального ремонту чи реконструкції будівельного об'єкта), а також при оцінюванні технічного стану конструкцій у період їх експлуатації.

Якщо несуча здатність конструкції покриття не відповідає вимогам норм проектування при врахуванні повного розрахункового снігового навантаження, її слід перевірити на дію навантаження, спрогнозованого за даними найближчої метеостанції. При достатній несучій здатності конструкції по відношенню до прогнозного навантаження можна дозволити її експлуатацію протягом однієї зими, а тим часом виконати комплекс підготовчих робіт, необхідних для заміни чи підсилення вказаної конструкції. Такий підхід може дати значну економію витрат на експлуатацію несучих конструкцій.

Розділ 3. НОРМУВАННЯ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

3.1. Метеорологічні дані, передумови, та імовірнісні моделі, використані при нормуванні вітрового навантаження

Нормування вітрового навантаження на території України виконане за результатами строкових вимірювань швидкості та напрямку вітру анеморумбомірами на 195 метеостанціях, схема розташування яких наведена на рисунку 3.1. Згідно з вимогами [26], швидкість вимірювалася на висоті близько 10 м при 10-хвилинному періоді осереднення. З метеорологічних щомісячників [24] за період з 1970 до 1990 року вибрані гістограми розподілу швидкості вітру для кожного місяця вказаного періоду. Максимум швидкості вітру за місяць прийнято рівним верхній межі найвищого непустилого інтервалу відповідної гістограми, що дозволило сформувати послідовності місячних максимумів швидкості вітру. Таким чином, для нормування вітрового навантаження загалом використано близько 12 мільйонів результатів строкових спостережень за вітром.

Порівняльний аналіз імовірнісних моделей та інші дослідження особливостей вітрового навантаження виконані за даними вибіркової мережі з 22 метеостанцій. Рівномірне по території України розташування метеостанцій та їх кількість, рівна 10% від загальної кількості українських метеостанцій, забезпечують репрезентативність цієї мережі та достовірність результатів досліджень.

На деяких метеостанціях висота розташування анемометра відрізняється від стандартної висоти 10 м. Для коригування даних використано відомий [15], [57] логарифмічний профіль вітру, який при характерних значеннях параметрів дає просту робочу формулу:

$$V = 4.6 \cdot V_z / \ln(10 \cdot Z) , \quad (3.1)$$

у якій V - швидкість вітру на стандартній висоті 10 м;
 V_z - швидкість вітру, виміряна на висоті Z метрів.

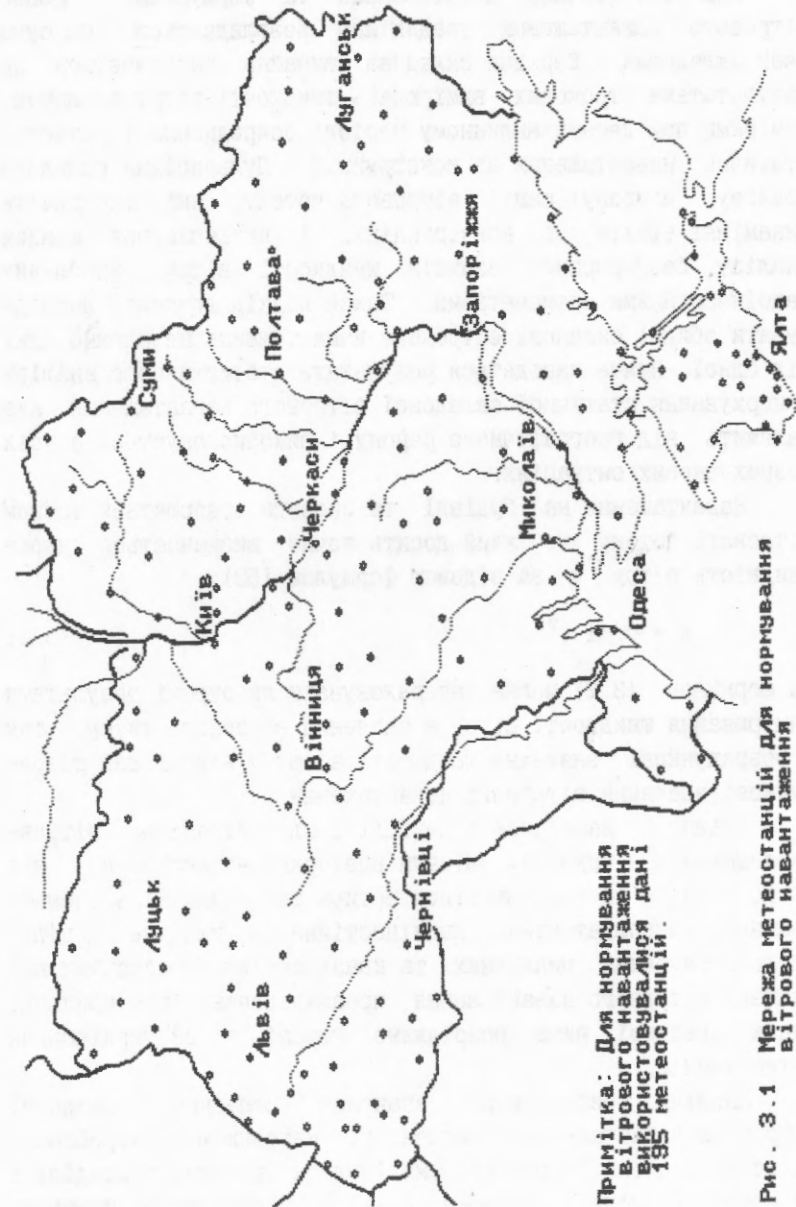


Рис. 3.1 Мережа метеостанцій для нормування вітрового навантаження

При статистичних дослідженнях та нормуванні процес вітрового навантаження традиційно розглядається, як сума двох складових. Середня складова звичайно визначається за результатами строкових вимірювань швидкості вітру анеморум-бомірами при десятихвилинному періоді осереднення і створює статичне навантаження на конструкції. Пульсаційна складова враховує мікропульсації вітрового потоку, які викликають динамічні ефекти в конструкціях, і визначається шляхом аналізу безперервних записів швидкості вітру, зроблених малоінерційними анемометрами. Такий підхід дозволяє досліджувати обидві складові вітрового навантаження незалежно одну від одної. Нижче наводяться результати статистичного аналізу і нормування статичної складової вітрового навантаження, яка залежить від географічного району і використовується в усіх розрахункових ситуаціях.

Навантаження на будівлі та споруди створюється тиском вітрового потоку w , який досить точно визначається через швидкість вітру v за відомою формулою [58]:

$$w = 0.61 v^2 \quad (3.2)$$

За формулою (3.2) можна перераховувати як окремі результати вимірювання швидкості вітру в значення вітрового тиску, так і розрахункові значення швидкості вітру у відповідні розрахункові значення вітрового навантаження.

Згідно з наведеною в розділі 1 класифікацією, вітрове навантаження є основним змінним повторним навантаженням, для якого можуть встановлюватися чотири розрахункові значення: граничне, експлуатаційне, квазіпостійне та циклічне. Доцільність нормування циклічних та квазіпостійних розрахункових значень вітрового навантаження проаналізована на прикладі даних згаданої вище розрідженої мережі з 22 українських метеостанцій.

Циклічні розрахункові значення середньої складової вітрового навантаження обчислені за методикою, розробленою на основі схеми середніх амплітуд та описаної в розділі 1 імовірнісної моделі диференційовного випадкового процесу.

Амплітуда еквівалентного гармонічного процесу задається його максимальним Q_{max} та мінімальним Q_{min} значеннями, відповідно рівними математичним сподіванням поточних максимумів та поточних мінімумів процесу навантаження. Частота завантажень n_c дорівнює частоті перевищень випадковим процесом швидкості вітру моди розподілу його ординати.

Згідно з отриманими результатами, частота завантажень n_c змінюється від 246 до 1314 1/рік. Максимальне циклічне значення вітрового навантаження Q_{max} змінюється від 3.2 Па до 60.7 Па, тобто не перевищує 15% розрахункового вітрового навантаження за СНІП [58]. Мінімальне циклічне значення Q_{min} настільки мале порівняно з його максимальним значенням Q_{max} , що можна для усіх метеостанцій прийняти $Q_{min} = 0$.

Вплив середньої складової вітрового навантаження на втомлюваність сталевих конструкцій проаналізовано шляхом співставлення даних окремих метеостанцій з кривою малоциклової втомлюваності у вигляді допустимого відношення δ/R_y , при якому гарантується надійна робота конструкції. Залежність δ/R_y обчислена за СНІП [60] для найгірших можливих умов роботи конструкцій. Обчислені за даними усіх метеостанцій відношення $Q_{max}/Q_m(50)$ при $T = 50$ років, які характеризують фактичний рівень циклічних напружень, розміщені нижче від кривої втомлюваності: $Q_{max}/Q_m(50) < \delta/R_y$. Згідно зі СНІП [59], втомлюваність залізобетонних конструкцій враховується коефіцієнтом умов роботи $\gamma_{B1} = \delta/R_y > 0.45$, який також перевищує фактичні рівні циклічного навантаження $Q_{max}/Q_m(50)$. Отже, дія середньої складової вітрового навантаження не може привести до відмови сталевих та залізобетонних елементів внаслідок втомлюваності.

Таким чином, нормувати циклічне розрахункове значення вітрового навантаження не потрібно, бо воно не може викликати явищ втомлюваності несучих конструкцій. При необхідності величини Q_{max} можуть бути приблизно визначені через граничні розрахункові значення $Q_m(40)$, що відповідають періоду повторюваності 40 років, за формулою:

$$Q_{max} = 2.4 \sqrt{Q_m(40)} \quad (3.3)$$

Залежність Q_{max} від Q_m (40) сильно розмита, а коефіцієнт кореляції дорівнює 0.42. Апроксимуюча крива (3.3) проведена по верхній межі дослідних точок, а тому її використання дає вельми наближену оцінку для Q_{max} , яка помітно завищує циклічні розрахункових значень вітрового навантаження.

Квазіпостійні розрахункові значення середньої складової вітрового навантаження проаналізовані на прикладі тих же 22 метеостанцій за методикою, аналогічною до використаної при нормуванні снігового навантаження. Результати обчислення показали, що квазіпостійне розрахункове значення у середньому складає 5.6% від граничного розрахункового значення вітрового навантаження, а в найгіршому випадку не перевищує 10.7%. Отже, нормування квазіпостійних розрахункових значень вітрового навантаження також не має сенсу.

Орієнтовну оцінку квазіпостійного розрахункового значення вітрового навантаження Q_p можна отримати за формулою:

$$Q_p = 0.08 Q_m \text{ (40) ,} \quad (3.4)$$

яка також відповідає верхній межі фактичної залежності Q_p від Q_m при коефіцієнті кореляції, рівному 0.70.

Для обчислення експлуатаційного розрахункового значення вітрового навантаження потрібно використовувати імовірнісну модель диференційовного випадкового процесу. Граничне розрахункове значення може обчислюватися як за імовірнісною моделлю диференційовного випадкового процесу, так і за послідовністю максимальних значень.

Порівняльний аналіз цих імовірнісних моделей виконано з урахуванням співвідношення отриманих розрахункових значень, їх випадкових та систематичних похибок, а також обсягів доступної метеорологічної інформації. Аналіз результатів порівняння показав, що найточнішою є модель випадкового процесу швидкості вітру, яку й рекомендується застосовувати для нормування вітрового навантаження. При використанні послідовностей максимальних значень слід віддати перевагу місячним максимумам перед річними.

Виходячи з вказівок розділу 1 та наведених результатів порівняльного аналізу, усі подальші розрахунки виконувалися на основі імовірнісної моделі стаціонарного диференційовного випадкового процесу швидкості вітру. Оцінки математичного сподівання та стандарту розподілу ординати швидкості вітру для кожної метеостанції обчислювалися за гістограмою, що об'єднує результати усіх строкових вимірювань швидкості вітру, виконаних протягом 21 року спостережень. Межі інтервалів коригувалися за формулою (3.1), яка враховує фактичну висоту розміщення анеморумбоміра на даній метеостанції. Ордината процесу швидкості вітру розподілена за законом Вейбулла (1.12), а ефективна частота для усієї території України прийнята рівною $\omega = 5.5$ 1/добу.

3.2. Граничні розрахункові значення вітрового навантаження

Граничні розрахункові значення вітрового навантаження $Q_m(T)$ обчислювалися за результатами строкових вимірювань швидкості вітру з десятихвилинним періодом осереднення, що відповідає традиційному підходу [57], [58] до нормування середньої складової вітрового навантаження. Рівні забезпеченості $Q_m(T)$, визначені за формулою (1.4) для характерних коефіцієнтів варіації та строків служби конструкцій в межах від 10 до 200 років, змінюються від 0.52 до 0.75. Враховуючи невеликий діапазон цих значень та незручність користування формулою (1.4) при застосуванні імовірнісної моделі випадкового процесу, граничні розрахункові значення вітрового навантаження обчислювалися для встановленого строку служби конструкції та уніфікованого рівня забезпеченості $P = 0.65$. При цьому похибки визначення $Q_m(T)$ не перевищують 4.4%.

З використанням формул (1.33) та (1.39) для кожної зі 195 метеостанцій України обчислені залежності граничного розрахункового значення вітрового навантаження $Q_m(T)$ від встановленого строку служби конструкцій $5 < T < 200$ років. Отримані значення змінюються в досить широких межах, що спо-

нукало проаналізувати їх достовірність та виявити причини великих відхилень від загального рівня.

Найбільшими є розрахункові навантаження для гірських метеостанцій, розташованих вище 500 м над рівнем моря. Вони різко виділяються з загального рівня, характерного для району їх розташування. Так наприклад, розрахункові навантаження для метеостанції Ай-Петрі відрізняються від даних найближчих метеостанцій (Ялта, Нікіта, Голубинка, Орлине) в 3 - 8 разів. Подібна різниця характерна і для деяких карпатських метеостанцій. У зв'язку з цим карта територіального районування розроблена для місцевостей з висотою до 500 м над рівнем моря, без урахування даних високогірних метеостанцій. Не враховувалися також дані деяких метеостанцій з явно заниженими значеннями розрахункових навантажень, які знаходяться у місцевостях, значною мірою захищених від дії вітру.

Карта територіального районування України за граничними розрахунковими значеннями вітрового навантаження розроблена за методикою, описаною в розділі 1. Базовий строк служби конструкцій прийнято рівним $T_0 = 40$ років. Виходячи з оціненої за рисунком 3.1 відстані між найближчими метеостанціями 40 - 60 км, константа згладжування у формулі (1.54) прийнята рівною $a = 30$ км. Необхідні запаси районування задані з використанням таблиці 1.4, а районні значення встановлені з інтервалом, близьким до одного стандарту випадкового поля розрахункових значень.

Розроблена карта територіального районування граничних розрахункових значень вітрового навантаження $Q_0 = Q_m(T_0)$ при базовому строкові служби $T_0 = 40$ років наведена на рисунку 3.2. На карті виділено п'ять районів з районними значеннями Q_0 від 300 Па до 800 Па. Аналіз запасів виконаного територіального районування показав, що фактичні навантаження $Q_m(40)$ для 12% метеостанцій перевищують встановлені картою районні значення Q_0 . Гістограма розподілу запасів карти районування має вигляд, близький до зображених на рисунках 2.4 і 2.7 аналогічних розподілів для снігового навантаження. Середній по Україні запас складає 52%.

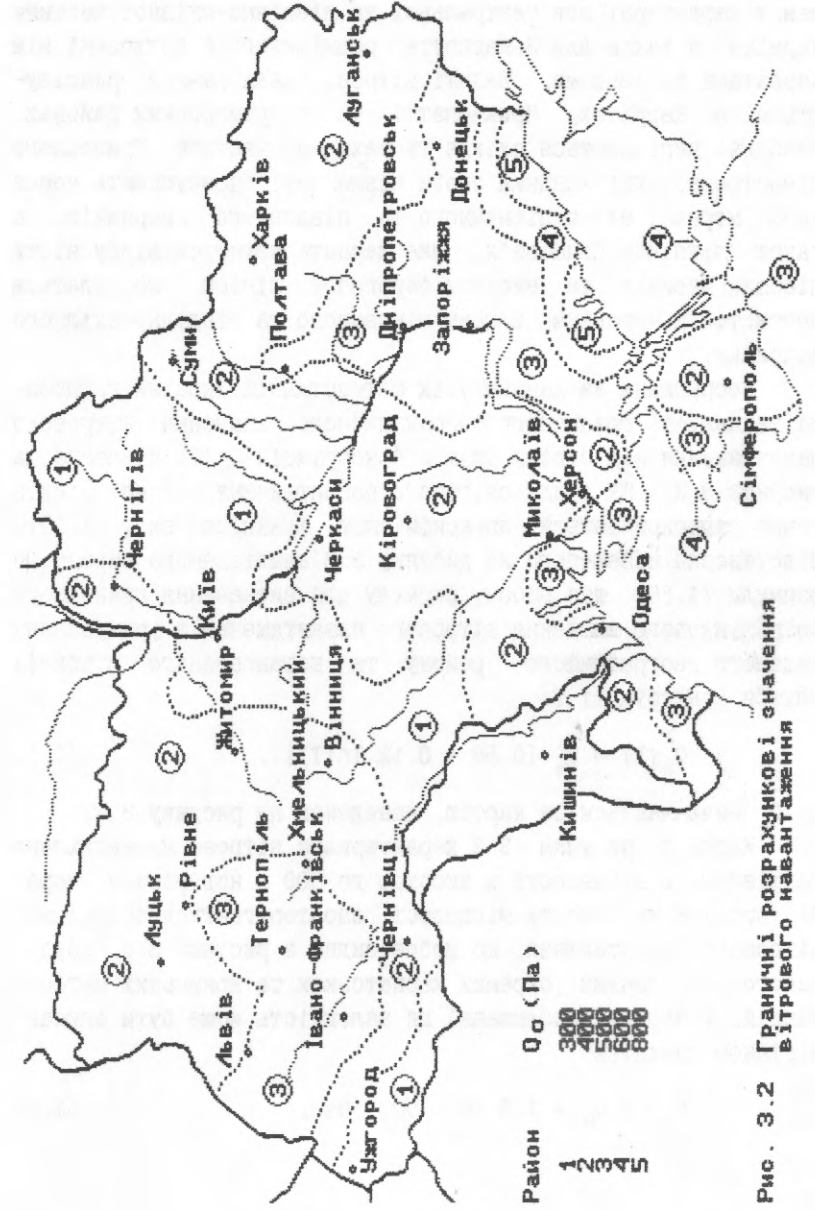


Рис. 3.2 Граничні розрахункові значення вітрового навантаження

З карти видно, що найменші значення вітрового навантаження характерні для центральної та північно-східної частини України, а також для Закарпаття, розміщеного в котловині між Карпатами та Альпами. Великі вітрові навантаження реалізуються в Карпатах, Прикарпатті та в приморських районах. Особливо вирізняються східна та західна частини Кримського півострова, які завдяки своїй низинності "пропускають через себе" морські вітри північного та південного напрямків, а також північне Приазов'я, яке характеризується відсутністю лісових масивів та високою береговою лінією, не здатною протистояти морським вітрам південного та південно-східного напрямку.

Осереднена за даними усіх метеостанцій України нормована залежність граничного розрахункового значення вітрового навантаження від строку служби конструкцій $Q_n(T)$ показана на рисунку 3.3. Як і для снігового навантаження, вона досить точно апроксимується логарифмічною функцією виду (1.59). Підстановка наведеного на рисунку 3.3 аналітичного виразу до формули (1.58) дає робочу формулу для визначення граничного розрахункового значення вітрового навантаження з урахуванням заданого географічного району та встановленого строкові служби конструкції T :

$$Q_n(T) = Q_0 [0.56 + 0.12 \ln(T)] , \quad (3.5)$$

де Q_0 визначається за картою, наведеною на рисунку 3.2.

Карта з рисунка 3.2 характеризує вітрове навантаження на рівнинній місцевості з висотою до 500 м над рівнем моря. Зі зростанням висоти місцевості спостерігається збільшення вітрового навантаження, що добре видно з рисунка 3.4, збудованого за даними окремих карпатських та кримських метеостанцій. У першому наближенні ця залежність може бути описана лінійною функцією:

$$Q_{0H} = Q_0 + 1.5 (H - 500) \text{ Па} , \quad (3.6)$$

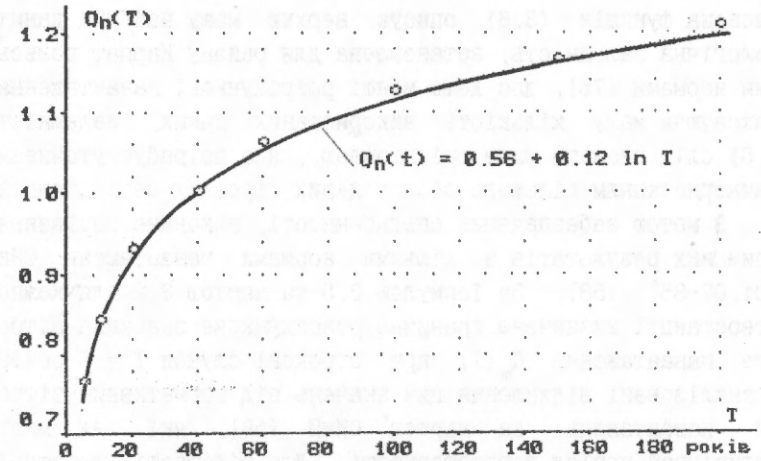


Рис. 3.3 Нормована залежність граничного розрахункового навантаження від строку служби конструкції

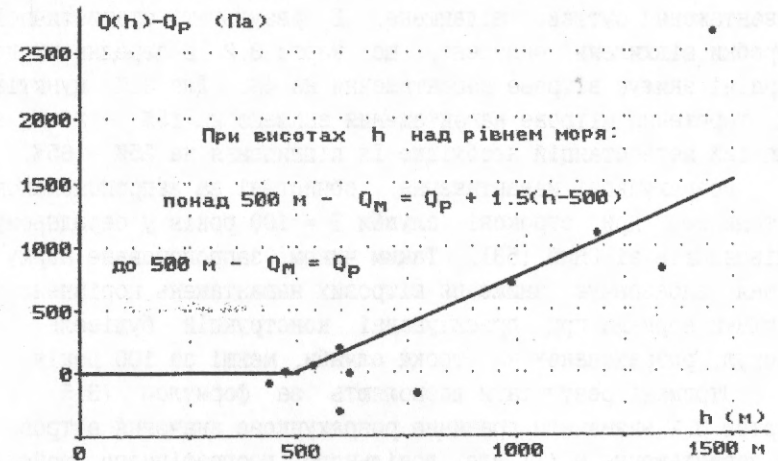


Рис. 3.4 Залежність граничного розрахункового вітрового навантаження Q_m від висоти над рівнем моря h

За винятком метеостанції Пожежевська, де спостерігається найбільше по Україні значення вітрового навантаження, запропонована функція (3.6) описує верхню межу наявних даних. Аналогічна залежність, встановлена для району Карпат польськими нормами [75], дає дещо менші розрахункові навантаження. Враховуючи малу кількість використаних даних, залежність (3.6) слід вважати лише орієнтовною, яка потребує уточнення з використанням більшого обсягу даних гірських метеостанцій.

З метою забезпечення спадкоємності, виконане порівняння отриманих результатів з діючими нормами навантажень СНиП 2.01.07-85* [58]. За формулою 3.5 та картою 3.2 для кожної метеостанції визначене граничне розрахункове значення вітрового навантаження $Q_m(T)$ при строковій службі $T = 5$ років. Проаналізовані відхилення цих значень від нормативних вітрових навантажень за картою СНиП [58], які теж мають п'ятирічний період повторюваності. Для більшості території України запропоноване районування мало відрізняється від СНиП [64]. Для центральних областей, частини Криму, поблизу Львова, Одеси, Херсона та Луганська вітрове навантаження менше, ніж в діючих нормах. В Приазов'ї навпаки, вітрове навантаження суттєво підвищене. В результаті статистичної обробки відхилень виявлено, що карта 3.2 в середньому по Україні знижує вітрове навантаження на 4%. Для 34% пунктів спостереження вітрове навантаження знижено на 15% - 25%, а для 12% метеостанцій необхідне їх підвищення на 25% - 65%.

Розрахункові навантаження, обчислені за запропонованою методикою, при строковій службі $T = 100$ років у середньому співпадають зі СНиП [58]. Таким чином, запропоноване нормування забезпечує зниження вітрових навантажень порівняно з діючими нормами при проектуванні конструкцій будівель та споруд, розрахованих на строки служби, менші за 100 років.

Отримані результати дозволяють за формулою (3.5) та картою 3.2 визначати граничне розрахункове значення вітрового навантаження $Q_m(T)$ для довільного географічного району України та строку служби несучої конструкції, що підлягає розрахунку.

3.3. Експлуатаційні розрахункові значення вітрового навантаження

Для нормування експлуатаційних розрахункових значень вітрового навантаження використані гістограми розподілу результатів строкових вимірювань швидкості вітру на 195 метеостанціях, зображених на рисунку 3.1. За даними кожної метеостанції обчислені залежності експлуатаційного розрахункового значення вітрового навантаження $Q_e(\mu)$ від частки строку служби конструкції $0.5 > \mu > 0.00001$, протягом якої воно може перевищуватися. Для цього використана формула (1.45), перетворена з урахуванням (3.2):

$$Q_e(\mu) = 0.61 \cdot [-\ln(\mu) / \beta]^{2/\alpha}, \quad (3.7)$$

де α і β - параметри закону Вейбулла розподілу швидкості вітру на даній метеостанції.

Характерні приклади отриманих за формулою (3.7) залежностей $Q_e(\mu)$ зображені на рисунку 3.5 у напівлогарифмічному масштабі. З рисунка видно, що експлуатаційні розрахункові навантаження залежать від вітрового режиму місцевості та встановленого значення μ . Подібність показаних залежностей для метеостанцій, розташованих в різних регіонах України, свідчить про можливість їх територіального районування за методикою, викладеною в підрозділі 1.6. На основі аналізу похибок встановлено, що при $0.1 > \mu > 0.0001$ базовим значенням частки строку служби найкраще вважати $\mu = 0.01$. Середня по території України нормована залежність експлуатаційного розрахункового значення $Q_n(\mu)$ від частки строку служби μ та апроксимована аналітичним виразом:

$$Q_n(\mu) = 0.358 \cdot [-\lg(\mu)]^{3/2}, \quad (3.8)$$

який дає цілком задовільну точність при $\mu < 0.1$. Отримана залежність $Q_n(\mu)$ та її апроксимація формулою (3.8) наведені на рисунку 3.6.

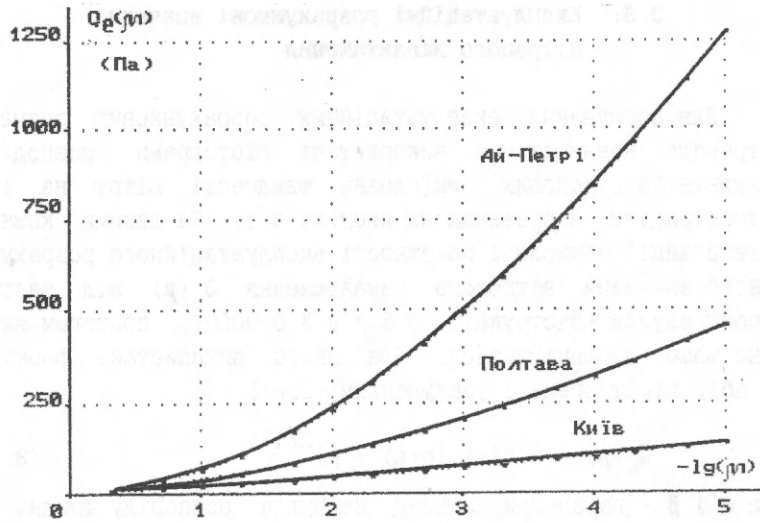


Рис. 3.5 Експлуатаційні розрахункові значення вітрового навантаження

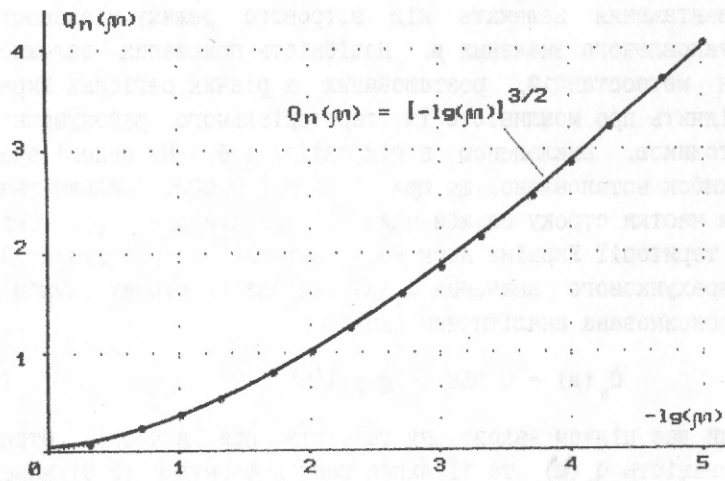


Рис. 3.6 Нормована залежність експлуатаційного навантаження від логарифма доли строку служби

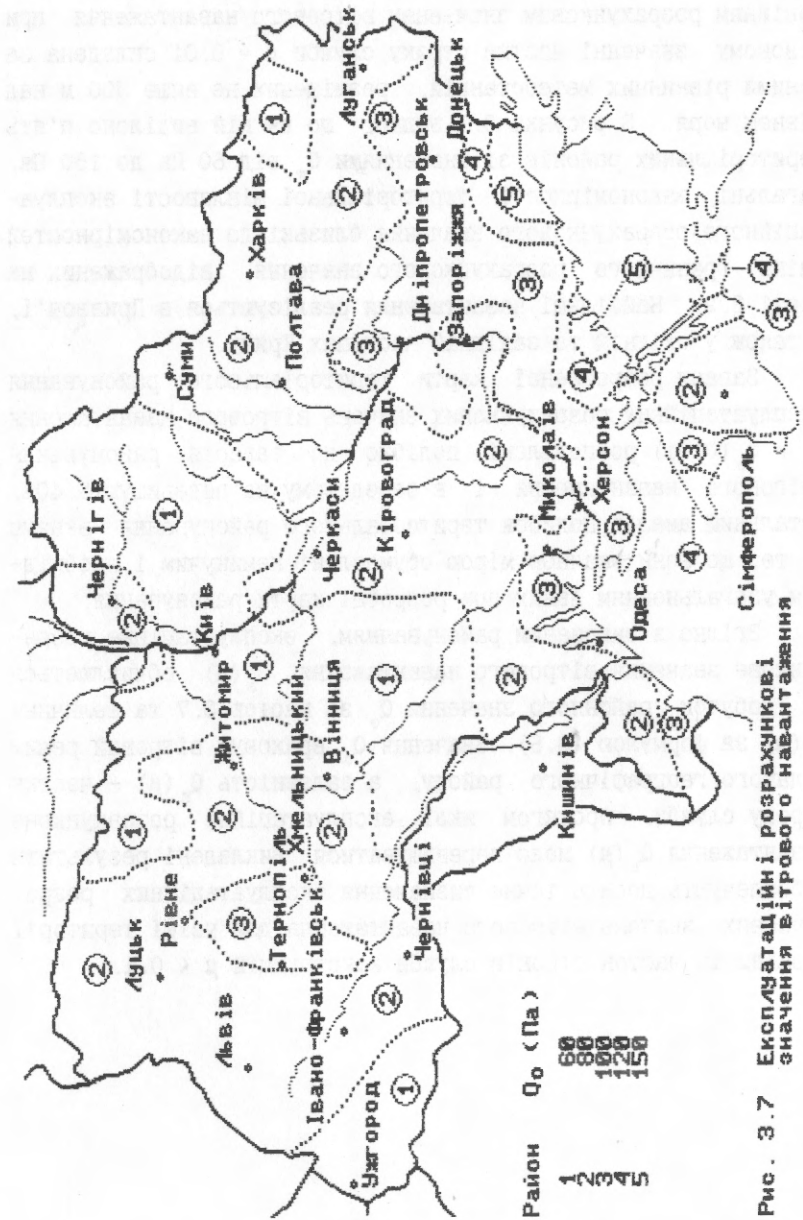


Рис. 3.7 Експлуатаційні розрахункові значення вітрового навантаження

Карта територіального районування України за експлуатаційним розрахунковим значенням вітрового навантаження при базовому значенні частки строку служби $\mu = 0.01$ складена за даними рівнинних метеостанцій, розміщених не вище 500 м над рівнем моря. З рисунка 3.7 видно, що на ній виділено п'ять територіальних районів зі значеннями Q_0 від 60 Па до 150 Па. Загальні закономірності територіальної мінливості експлуатаційного розрахункового значення близькі до закономірностей зміни граничного розрахункового значення, відображених на карті 3.2. Найбільші навантаження реалізуються в Приазов'ї, а також у східній та західній частинах Криму.

Запаси розробленої карти територіального районування експлуатаційних розрахункових значень вітрового навантаження $Q_0 = Q_e(0.01)$ розподілені подібно до запасів районування снігового навантаження 1 в середньому не перевищують 40%. Детальний аналіз похибок територіального районування вказує на те, що вони значною мірою обумовлені неминучим і необхідним узагальненням даних при розробці карти районування.

Згідно з виконаним районуванням, експлуатаційне розрахункове значення вітрового навантаження $Q_e(\mu)$ обчислюється як добуток районного значення Q_0 за картою 3.7 та величини $Q_n(\mu)$ за формулою (3.8). Значення Q_0 враховує вітровий режим заданого географічного району, а залежність $Q_n(\mu)$ - частку строку служби, протягом якої експлуатаційне розрахункове навантаження $Q_e(\mu)$ може перевищуватися. Викладені результати забезпечують досить точно визначення експлуатаційних розрахункових значень вітрового навантаження для усієї території України та часток строків служби конструкцій $\mu < 0.1$.

3.4. Урахування напрямку вітру при нормуванні вітрового навантаження

В практиці нормування вітрового навантаження прийнято визначати його розрахункові значення без урахування напрямку вітру. Такий підхід забезпечує достатню надійність несучих конструкцій, незалежно від просторової орієнтації будівлі чи споруди, але не враховує очевидного факту: навантаження від вітрів різних напрямків звичайно сприймаються різними конструкціями. Урахування просторової орієнтації конкретної будівлі чи споруди дозволить уточнити вітрове навантаження на несучі конструкції та, судячи з результатів досліджень [34], може дати економічний ефект.

Швидкість вітрового потоку у визначеній точці простору є вектором, який випадковим чином змінюється у часі. Результати строкових спостережень містять дані про швидкість та напрямок вітру і дозволяють обчислити розрахункові значення вітрового навантаження з урахуванням орієнтації будівлі за сторонами світу. Для цього використані опубліковані в [63] дані 25 метеостанцій України, перелічених в таблиці 3.1. Усі враховані метеостанції характеризуються рівномірними розами відкритості флюгера: різниця між найбільшим та найменшим значеннями показника відкритості за [63] не перевищує 1 - 2 балів. Опубліковані в [63] дані метеостанцій з невідомими чи нерівномірними розами відкритості флюгера не враховувалися.

Використані значення швидкості вітру, яка вимірювалася флюгером Вільда протягом 15 років, згруповані за 12 місяцями року, 8 румбами та 10 інтервалами швидкості. В результаті об'єднання місячних гістограм в річні для кожної метеостанції отримано 8 гістограм розподілу швидкості вітру, що відповідають 8 румбам. Межі інтервалів гістограм скориговані згідно з наведеною в [15] пропозицією Р.П. Бернгардта та додатково зменшені на 10% з метою приведення до стандартного 10-хвилинного інтервалу осереднення [57].

Таблиця 3.1

Залежності граничного розрахункового значення вітрового навантаження від напрямку вітру

Метеостанції	Коефіцієнти $1000 \times k_j$ для румбів							
	Півн 0°	ПнС 45°	С 90°	ПдС 135°	Півд 180°	ПдЗ 225°	З 270°	ПнЗ 315°
Ковель	348	232	390	572	424	740	774	583
Львів	269	190	356	624	415	764	801	526
Шепетівка	414	219	395	581	445	610	1000	828
Кам'янець-Поділ.	469	198	323	597	312	309	612	889
Чернівці	408	194	370	526	264	328	656	809
Чернігів	516	503	635	690	642	524	599	622
Овруч	596	458	481	540	502	612	809	768
Київ	578	476	495	493	368	531	821	704
Вінниця	501	418	406	511	567	512	759	775
Луганськ	227	363	685	519	392	589	623	355
Дніпропетровськ	495	429	560	602	642	630	450	597
Тип 1	596	503	685	690	642	764	1000	889
Ужгород	776	801	422	434	387	321	408	783
Умань	586	405	452	374	301	325	603	1000
Ізмаїл	790	619	339	351	361	275	416	667
Миколаїв	630	635	606	413	598	514	442	591
Херсон	614	684	701	407	334	410	493	560
Тип 2	790	801	701	434	598	514	603	1000
Асканія-Нова	483	803	981	516	325	510	407	375
Конотоп	527	514	678	661	522	522	575	630
Полтава	439	641	1000	610	406	442	581	592
Харків	473	535	729	591	413	563	545	582
Волноваха	401	689	924	509	375	531	521	365
Маріуполь	361	502	771	403	348	587	478	441
Мелітополь	390	537	897	558	397	505	497	423
Мисове	357	679	1000	548	418	380	645	525
Сімферополь	404	809	701	377	402	574	346	189
Тип 3	527	809	1000	661	522	587	645	630

Досить простий підхід до розробки імовірнісної моделі вітрового потоку полягає у тому, що дані, згруповані відповідно до прийнятих у кліматології румбів [63], розглядаються як умовні розподіли швидкості вітру при фіксованих значеннях азимута. При цьому густина спільного розподілу

швидкості v та азимута a описується системою з 8 умовних розподілів швидкості вітру $f_j(v)$. Аналіз гістограм цих розподілів за допомогою імовірнісного паперу показав, що вони можуть бути описані законом Вейбулла (1.12).

На поверхню будівлі діють вітри з напрямків $\pm 90^\circ$ від нормалі до поверхні. Згідно з правилами розкладу сил, діючих під кутом, та даних [58] щодо визначення аеродинамічних коефіцієнтів, нормальна до поверхні споруди складова вітрового тиску на 1 м^2 дорівнює:

$$q = 0.61 \cos^2 \varphi v^2(\varphi), \quad (3.9)$$

де φ - кут між напрямком вітру та нормаллю до поверхні;

$v(\varphi)$ - швидкість вітру, напрямком якого визначений кут φ .

Розглянувши показані на рисунку 3.8 три суміжних румби з урахуванням закону розподілу Вейбулла та формули (3.9), можна визначити загальну імовірність перевищення швидкості v_j вітрами, які діють на поверхню споруди. Прирівнявши її до допустимої імовірності перевищення розрахункового навантаження (1.33), отримуємо трансцендентне рівняння, розв'язок якого v_j легко перерахувати за формулою (3.2) в граничне розрахункове значення вітрового навантаження на поверхню, перпендикулярну напрямку вітру j -того румба:

$$Q_j = 0.61 v_j^2. \quad (3.10)$$

Понижуючий коефіцієнт по відношенню до розрахункового навантаження Q_m , обчисленого без урахування напрямку вітру, дорівнює:

$$k_j = Q_j / Q_m. \quad (3.11)$$

Нормування коефіцієнтів k_j замість розрахункових навантажень Q_j дозволяє використати розроблену карту територіального районування України 3.2 та забезпечує близькість форми подання вітрового навантаження до євронорм [71], де існує аналогічний коефіцієнт.

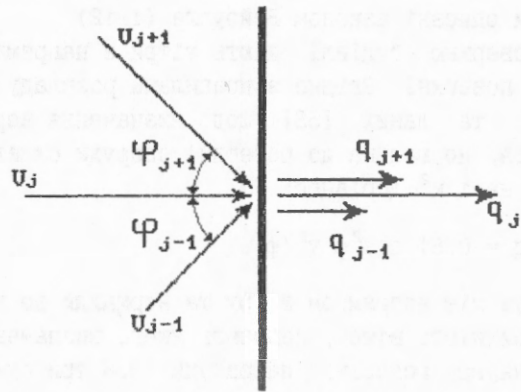


Рис. 3.8 Дія вітру суміжних румбів на поверхню споруди

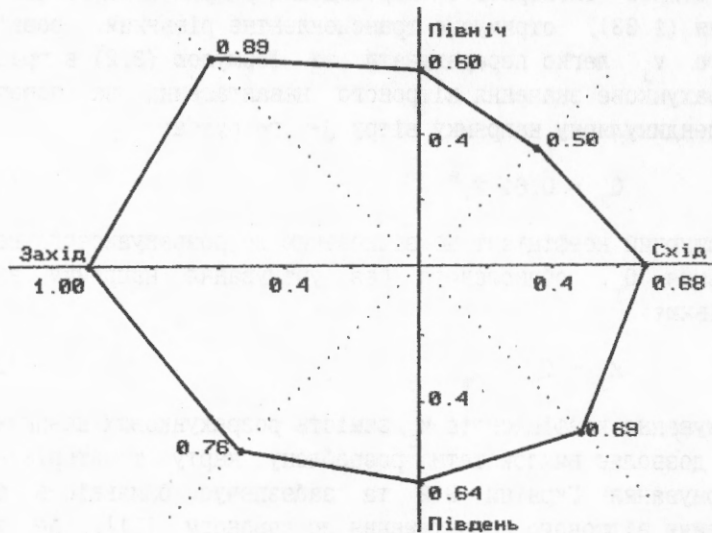


Рис. 3.9 Рози коефіцієнтів k_j типу 1

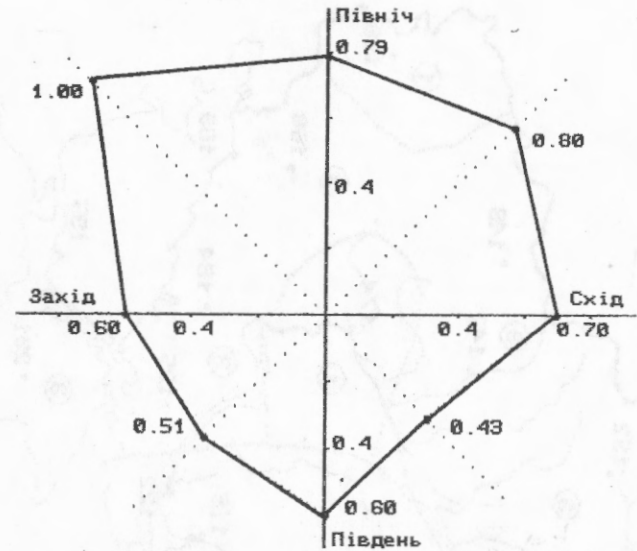


Рис. 3.10 Рози коефіцієнтів k_j типу 2

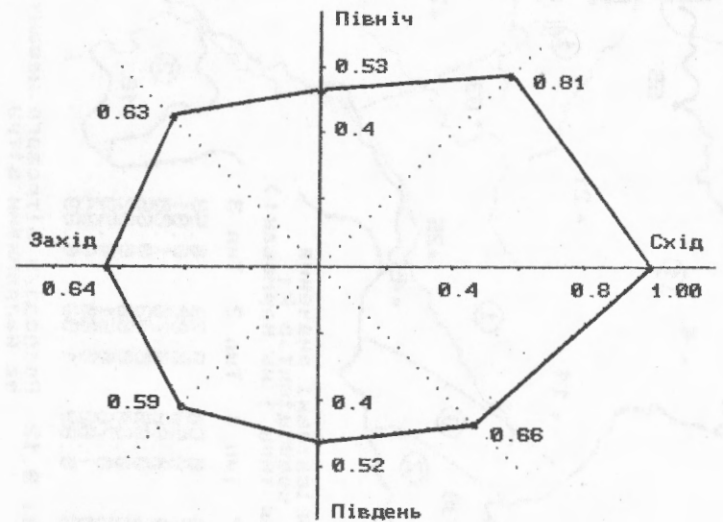


Рис. 3.11 Рози коефіцієнтів k_j типу 3

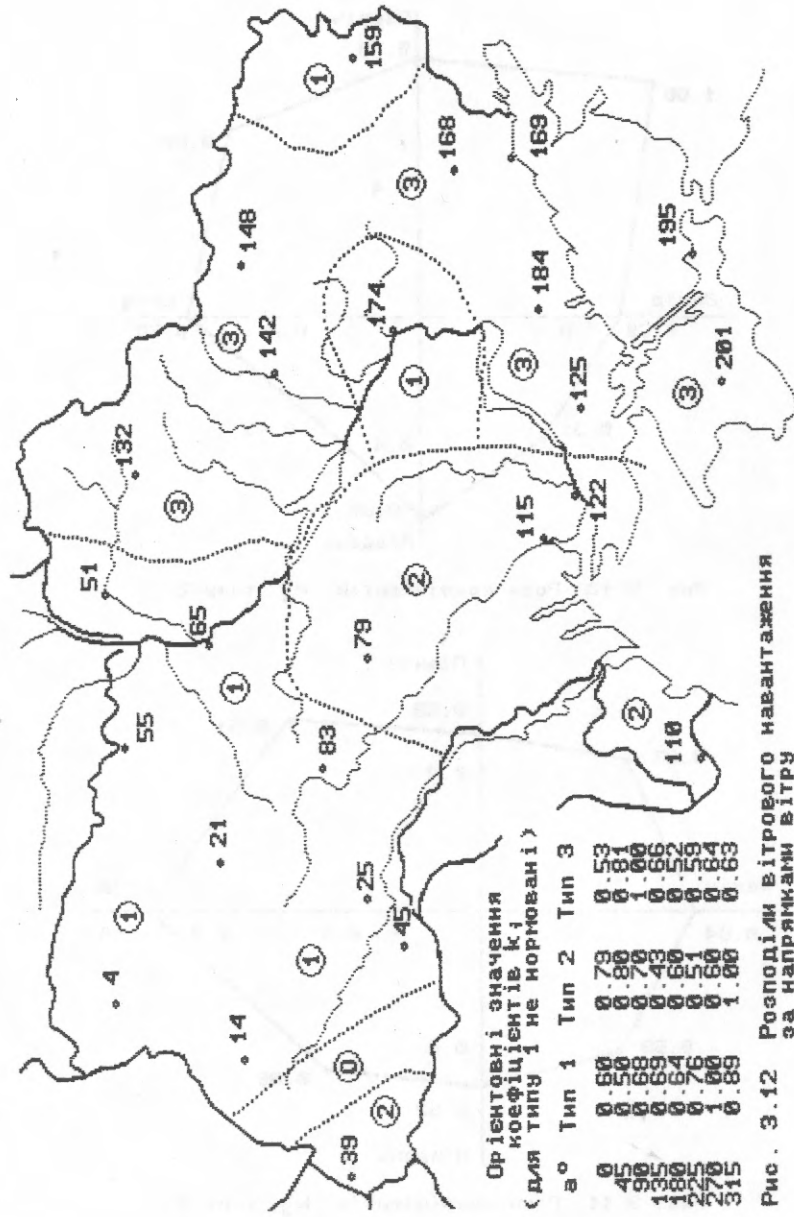


Рис. 3.12 Розподіл вітрового навантаження за напрямками вітру

Обчислення показали, що коефіцієнти k_f залежать від напрямку вітру α встановленого строку служби конструкції T . Оскільки при $T > 10$ років значення k_f змінюються мало, вони обчислені для $T = 100$ років, що забезпечує запас надійності та дозволяє не враховувати залежність k_f від T . Коефіцієнти k_f для усіх метеостанцій та румбів, обчислені за формулою (3.11) при $T = 100$ років, наведені в таблиці 3.1.

Аналіз таблиці 5.20 показує, що найменші значення k_f коливаються в межах від 0.2 до 0.5. Отже, для деяких районів України та окремих напрямків вітру граничне розрахункове навантаження може бути знижене у 2 - 5 разів. Для більшості метеостанцій цей ефект спостерігається при вітрах північно-східного або південно-західного напрямків. Середні за усіма румбами коефіцієнти k_f становлять 0.5 - 0.6, що свідчить про наявність загального економічного ефекту від урахування орієнтації будівель.

З метою узагальнення отриманих результатів метеостанції згруповані за формами діаграм коефіцієнтів k_f у три групи, вказані в таблиці 3.1. Узагальнення діаграм виконане в запас надійності конструкцій шляхом вибору максимальних значень k_f для кожного румба. Групові діаграми коефіцієнтів k_f наведені в таблиці 3.1 та зображені на рисунках 3.9, 3.10, 3.11. Схема територіального районування України за розподілом вітрових навантажень по напрямках наведена на рисунку 3.12.

З рисунків та карти видно, що розподіли вітрового навантаження за напрямками мають нерівномірний характер. Для першого району, який в основному займає північно-східну зону України, домінують вітри західного напрямку. Третій район, який займає майже все Лівобережжя та Крим, характеризується сильними східними вітрами, а на території другого району (Закарпаття та південний захід України) найбільші навантаження створюються вітрами північно-західного та північного напрямків.

Для орієнтовного визначення граничного розрахункового значення вітрового навантаження з урахуванням строку служби та просторової орієнтації будівлі необхідно обчислити це значення за формулою (3.5) та картою 3.2, а потім помножити на коефіцієнт k_j , взятий з карти на рисунку 3.12. Відмітимо, що запропонована карта районування та значення коефіцієнтів k_j є орієнтовними і потребують подальшого уточнення на основі більшого обсягу метеорологічної інформації.

Окрім того, розподіл вітрових навантажень за напрямком значною мірою залежить від мікрорельєфу місцевості та характеру забудови в районі розташування споруди. У багатьох випадках вплив місцевих факторів може стати вирішальним, а тому урахувати орієнтацію будівель при визначенні вітрового навантаження можна лише після детального дослідження з використанням надійних метеорологічних даних та даних про рельєф місцевості в зоні будівельної площадки.

Розділ 4. ІМОВІРНІСНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ НОРМУВАННЯ ІНШИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВПЛИВІВ

4.1. Нормування атмосферних навантажень на об'єкт, що експлуатується в Чорнобилі

При нормуванні навантажень на конструкції, які перебувають в експлуатації, а також на особливо відповідальні чи унікальні об'єкти слід враховувати такі особливості:

- проектним завданням можуть визначатися особливі вимоги до забезпеченостей розрахункових навантажень;
- замовником можуть бути встановлені незвичайно великі, або навпаки, малі строки служби конструкцій;
- розрахункові навантаження необхідно обчислювати за даними найближчих метеостанцій з урахуванням географічних особливостей будівельного майданчика;
- необхідність визначення динамічних складових, квазіпостійних чи циклічних розрахункових значень навантажень, для яких вони звичайно не нормуються;
- необхідність поглибленого аналізу точності результатів.

Нижче наведений приклад визначення снігового та вітрового навантажень за даними метеостанції Чорнобиль. Отримані результати можна використати при розрахунках укриття 4-го енергоблоку Чорнобильської АЕС, а загальний підхід - при нормуванні навантажень на інші унікальні об'єкти. Розрахункові значення обчислювалися за тими ж імовірнісними моделями та формулами, що й при нормуванні навантажень для території України. Для оцінювання статистичних характеристик ваги снігового покриву на поверхні землі використані результати снігозйомок протягом 27 років. Статистичні характеристики середньої складової швидкості вітру оцінювалися за результатами строкових спостережень протягом 21 року. Отримані оцінки статистичних характеристик наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Статистичні характеристики атмосферних навантажень за даними метеостанції Чорнобиль

Моделі навантажень	Одиниці	M	S	A
Процес швидкості вітру $\omega = 5.5$ 1/добу; $\rho = 0.8$	м/сек	2.98	2.56	-
Ненульові значення снігового навантаження	паскалі	402.9	293.1	1.280
Річні максимуми снігового навантаження	паскалі	587.1	387.2	-

Експлуатаційні розрахункові значення снігового та вітрового навантажень $Q_e(\mu)$ залежать від частки строку служби μ , протягом якої вони можуть перевищуватися. Як було зроблено в розділах 2 1 3 при нормуванні навантажень для території України, значення $Q_e(\mu)$ вітрового навантаження обчислені за розподілом ординати випадкового процесу швидкості вітру, а снігового навантаження - за вибіркою ненульових значень ваги снігового покриву.

Результати обчислень $Q_e(\mu)$ наведені в таблиці 4.2. Там же вказані стандарти S_Q оцінок експлуатаційних розрахункових значень, обчислені на основі формули (1.49). Це дозволило за формулою (1.51) визначити верхню межу довірчого інтервалу для розрахункового значення $Q_{e,max}$, яка забезпечує необхідний запас надійності з урахуванням випадкового характеру оцінки $Q_e(\mu)$. Як приклад, в таблиці 4.2 наведені значення для довірчої імовірності 0.95:

$$Q_{e,max} = Q_e(\mu) + t S_Q = Q_e(\mu) + 1.64 S_Q. \quad (4.1)$$

Значення $Q_{e,max}$ для інших довірчих імовірностей легко отримати за даними таблиці 4.2 та формулою (4.1) при відповідному значенні квантиля нормального розподілу t .

Таблиця 4.2

Експлуатаційні розрахункові значення навантажень за даними метеостанції Чорнобиль (в паскалях)

Частка строку служби μ	Снігове навантаження			Вітрове навантаження		
	$Q_e(\mu)$	S_Q	$Q_{e,max}$	$Q_e(\mu)$	S_Q	$Q_{e,max}$
0.10000	296	45	370	25	0.3	26
0.05000	536	92	688	39	0.5	40
0.02000	777	154	1029	62	0.8	64
0.01000	929	200	1257	82	1.2	84
0.00500	1067	245	1469	105	1.9	108
0.00200	1231	299	1721	137	3.2	143
0.00100	1345	333	1891	165	4.5	172
0.00050	1451	359	2040	194	6.0	204
0.00020	1589	382	2215	236	7.8	248
0.00010	1685	387	2320	269	8.4	283
0.00005	1779	383	2408	305	8.0	318
0.00002	1899	365	2498	355	5.9	364
0.00001	1984	342	2545	394	3.8	400

Таблиця 4.3

Граничні розрахункові значення навантажень за даними метеостанції Чорнобиль (в паскалях)

Середній період повтор. T_m	Снігове навантаження			Вітрове навантаження		
	$Q_m(T_m)$	S_Q	$Q_{m,max}$	$Q_m(T_m)$	S_Q	$Q_{m,max}$
1	87	66	196	169	1.4	171
2	452	64	557	195	1.7	198
5	786	83	922	238	2.5	242
10	1006	114	1194	272	3.2	277
20	1218	150	1464	308	4.0	315
50	1492	199	1819	359	5.3	368
100	1698	237	2087	399	6.5	410
200	1902	276	2355	441	7.8	454
500	2173	328	2710	500	9.9	516
1000	2377	367	2979	546	11.7	565
2000	2581	407	3248	594	13.6	616
5000	2850	459	3603	659	16.5	686
10000	3054	499	3873	711	18.8	742

Збудована аналогічним чином таблиця 4.3 містить залежності граничних розрахункових значень снігового та вітрового навантажень $Q_m(T_m)$ від середнього періоду повторюваності T_m . Для снігового навантаження вони обчислені за послідовністю річних максимумів ваги снігового покриву, а для вітрового – за імовірнісною моделлю диференційованого випадкового процесу швидкості вітру. Стандарти S_Q та верхні межі довірчих інтервалів $Q_{m,max}$ для оцінок граничних значень $Q_m(T_m)$ обчислені за формулами (1.49), (1.51) та (4.1).

При необхідності можна перейти від значень $Q_m(T_m)$ для середнього періоду повторюваності T_m , наведених в таблиці 4.3, до розрахункового значення $Q_m(T)$, що відповідає встановленому строкові служби T та забезпеченості P . Для цього слід скористатися формулою

$$T_m = -T / \ln(P), \quad (4.2)$$

після чого вибрати відповідне значення $Q_m(T_m)$ чи $Q_{m,max}$ з таблиці 4.3.

З таблиць видно, що розрахункові значення вітрового навантаження визначені точніше, ніж снігового. Для граничного розрахункового значення снігового навантаження це пояснюється невеликою довжиною послідовності річних максимумів ваги снігового покриву. На точність експлуатаційного розрахункового значення поряд з порівняно невеликим обсягом вихідних даних, вплинуло також застосування поліномо-експоненціального розподілу, який враховує три статистичні моменти вибірки замість двох, необхідних для розподілів Вейбулла та Гумбеля.

Порівняння даних таблиці 4.3 зі СНиП 2.01.07-85 [58] показує, що період повторюваності розрахункового вітрового навантаження за СНиП близький до 100 років, а розрахункове снігове навантаження за СНиП [58] перевищується у середньому кожні 10 років. Це підтверджує актуальність виконаного вище нормування атмосферних навантажень за даними метеостанції Чорнобиль, бо розрахунок укриття на дію снігового навантаження за СНиП [58] не гарантує його надійної роботи. Аналогічний висновок зроблено також в роботі [56].

4.2. Імовірнісна модель та методика нормування впливу температури повітря на будівельні конструкції

Температура повітря вимірюється на метеостанціях трьома термометрами, встановленими в психрометричній будці з метою захисту від сонячної радіації [26]. Показання мінімального та максимального термометрів знімаються один раз на добу, що дозволяє встановити екстремальні добові температури, а кожні три години фіксуються показання строкового термометра, які відображують добовий хід температури та її середньодобове значення. Узагальнені результати вимірювань опубліковані в довіднику [62] та метеорологічних щомісячниках [24].

Нижче використані дані довідника [62] по середньодобових температурах повітря на шести метеостанціях: Київ, Львів, Одеса, Полтава, Сімферополь, Чернігів. Вони розташовані в різних географічних районах України з різноманітними температурними режимами, що дає можливість зробити досить загальні висновки. Розгляд процесу температури з інтервалом квантування за часом, меншим однієї доби, не має практичного сенсу. Добовий хід температури повітря має чітко виражений циклічний характер [15] і може бути поданий у вигляді квазігармонічного процесу з детермінованою частотою, який враховується додатково до процесу середньодобової температури.

Попередній аналіз даних та результати дослідження [4] дозволяють висунути гіпотезу, що процес зміни температури повітря можна представити у вигляді квазістаціонарного диференційованого випадкового процесу з річним періодом нестационарності. У попередніх розділах така модель використана для подання вітрового та снігового навантажень. Її обґрунтування зводиться до визначення виду закону розподілу ординати, дослідження функцій числових характеристик та частотної структури процесу зміни температури повітря.

Закон розподілу ординати та функції числових характеристик встановлені за гістограмами розподілу середньодобових температур в кожному з місяців року [62]. За послідовністю з 12 місячних гістограм для кожної метеостанції обчислені

річні функції математичного сподівання $M(t)$, стандарта $S(t)$, коефіцієнтів асиметрії $A(t)$ та ексцесу $E(t)$. Як приклад, на рисунках 4.1 та 4.2 наведені функції числових характеристик для метеостанції Полтава. Математичне сподівання та стандарт мають виражені сезонні тренди, які досить точно апроксимуються рядами Фур'є з однією парою коефіцієнтів.

Зображені на рисунку 4.2 коефіцієнти ексцесу близькі до нуля і не мають вираженого сезонного характеру. Коефіцієнт асиметрії для холодних пір року переважно менший нуля, а в літні місяці збільшується, приймаючи додатні значення. Співставлення рисунків 4.1 та 4.2 вказує на пряму залежність коефіцієнта асиметрії A від математичного сподівання M . Стандарт S змінюється обернено пропорційно до математичного сподівання: в теплі місяці стандарти приймають невеликі значення, а в холодні збільшуються, вказуючи на більшу мінливість зимових температур. Такі залежності A і S від M просліджуються і в даних інших метеостанцій.

На рисунках 4.3 і 4.4 зображені залежності стандартів S та коефіцієнтів асиметрії A від значень математичного сподівання M , отримані за даними усіх шести метеостанцій. Ці залежності (особливо залежність A від M) сильно розмиті, але наближено описуються поліномами третього ступеня:

$$S = 5.27 - 0.11 M + 0.00831 M^2 - 0.00035 M^3; \quad (4.3)$$

$$A = -0.325 + 0.0426 M - 0.00187 M^2 + 0.0000274 M^3, \quad (4.4)$$

використання яких дозволяє спростити імовірнісну модель процесу температури повітря.

Приклади розподілів ординати процесу температури повітря для найхолоднішого (січень) та найтеплішого (липень) місяців року на метеостанції Полтава наведені на рисунку 4.5. Розподіл липневих температур досить близький до зображеного на рисунку розподілу Гаусса, що підтверджується також значенням коефіцієнта асиметрії $A = 0.05$. Розподіл січневих температур має виражену лівосторонню асиметрію з $A = -0.67$, але також може наближено апроксимуватися нормальним законом.

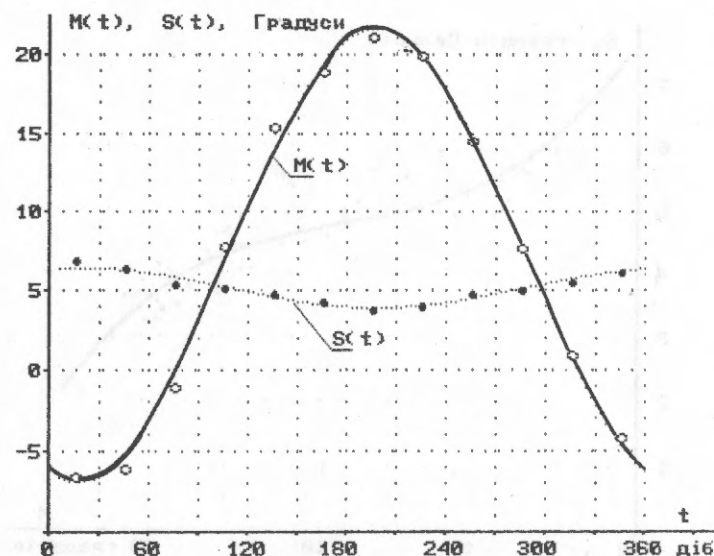


Рис. 4.1 Функції математичного сподівання та стандарту температури повітря на метеостанції Полтава

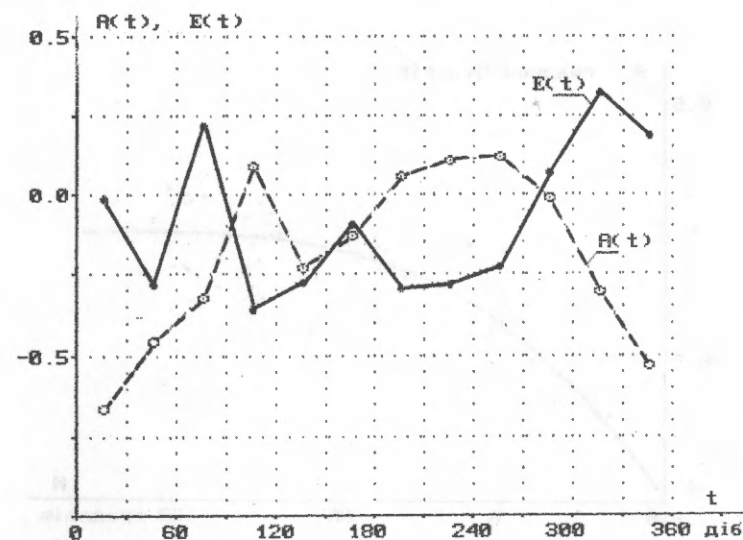


Рис. 4.2 Функції коефіцієнтів асиметрії та ексцесу температури повітря на метеостанції Полтава

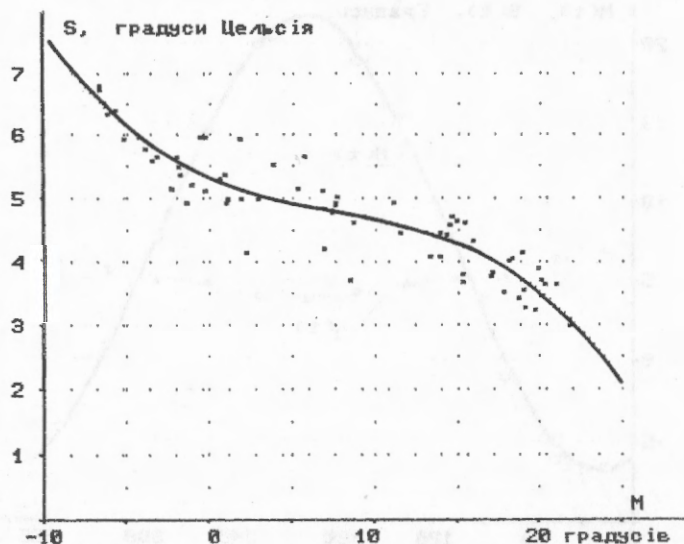


Рис. 4.3 Залежність стандарту S процесу температури повітря від математичного сподівання M

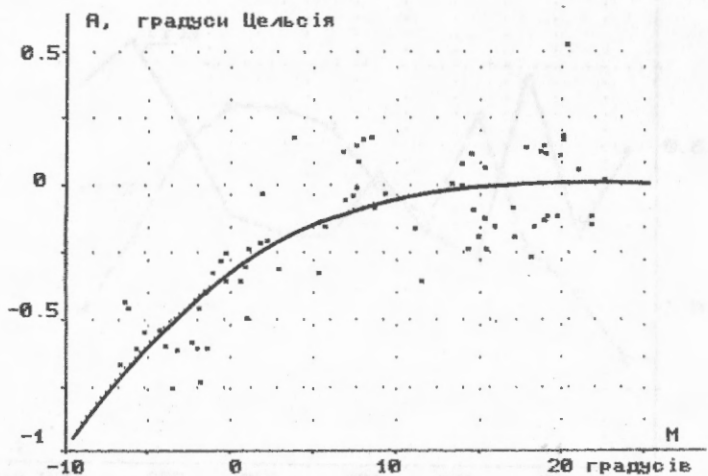


Рис. 4.4 Залежність коефіцієнта асиметрії розподілу температури повітря від математ. сподівання

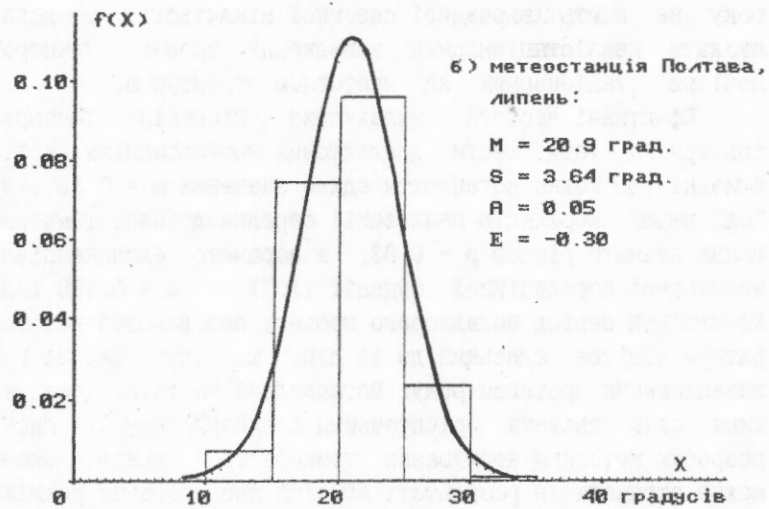
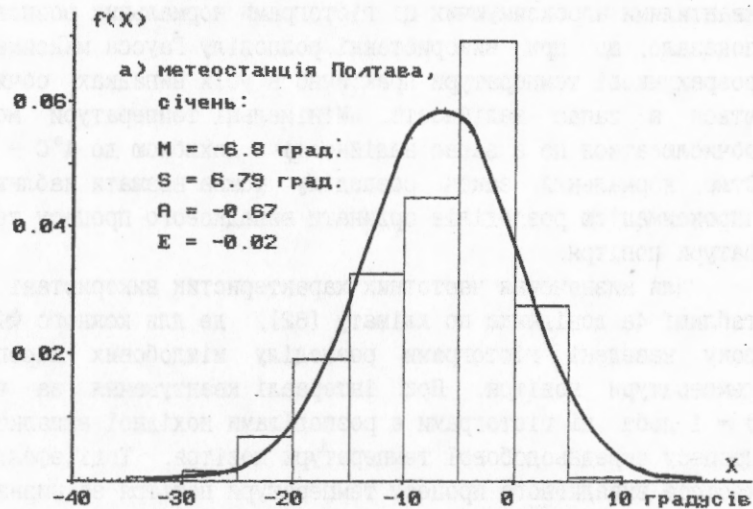


Рис. 4.5 Розподіли середньодобової температури повітря для найхолоднішого та найтеплішого місяців

Співставлення меж інтервалів гістограм з відповідними квантилями апроксимуючих ці гістограми нормальних розподілів показало, що при використанні розподілу Гаусса максимальні розрахункові температури практично в усіх випадках обчислюються в запас надійності. Мінімальні температури можуть обчислюватися не в запас надійності з похибкою до $4^{\circ}\text{C} - 6^{\circ}\text{C}$. Отже, нормальний закон розподілу можна вважати наближеною апроксимацією розподілів ординати випадкового процесу температури повітря.

Для визначення частотних характеристик використані дані таблиці 4а довідника по клімату [62], де для кожного місяця року наведені гістограми розподілу міждобових перепадів температури повітря. При інтервалі квантування за часом $d = 1$ доба ці гістограми є розподілами похідної випадкового процесу середньодобової температури повітря. Тоді ефективна частота випадкового процесу температури повітря за визначенням [5] дорівнює відношенню стандарту похідної до стандарту самого процесу. Результати обчислень показали, що отримані таким чином послідовності ефективних частот для усіх місяців року не мають вираженої сезонної мінливості. Це дозволяє вважати квазістаціонарний випадковий процес температури повітря стаціонарним за частотною структурою.

Ефективні частоти випадкових процесів температури повітря на усіх шести досліджених метеостанціях настільки близькі, що можна встановити єдине значення $\omega = 0.59$ 1/добу. Тоді першу кореляцію реалізації середньодобової температури можна вважати рівною $\rho = 0.83$, а параметр експоненціальної нормованої кореляційної функції (1.7) - $\alpha = 0.186$ 1/добу. Ефективний період випадкового процесу середньодобової температури повітря близький до 11 діб, що відповідає 34 циклам навантаження протягом року. Встановлені частотні характеристики слід вважати орієнтовними і використовувати лише для розробки методики нормування температур. Точніші значення можна отримати в результаті обробки безперервних реалізацій процесу середньодобової температури на різних метеостанціях України.

Для визначення температурних деформацій та напружень в конструкціях необхідно від температури повітря перейти до температури самої конструкції, на яку впливають її теплотехнічні характеристики та умови розміщення. Завдяки тепловій інерції, залежної від масивності конструкції та теплопровідності матеріалу, процес температури конструкції є згладженим процесом температури повітря. Інтервал згладжування, рівний часові стабілізації температури конструкції, можна визначити методами будівельної фізики. Аналогічний підхід реалізований в будівельній теплотехніці, де розрахункове значення кліматичної температури визначається в залежності від масивності огорожуючої конструкції.

Будемо вважати температуру конструкції $y(t)$ випадковим процесом, отриманим у результаті лінійного згладжування випадкового процесу температури повітря $x(t)$ при інтервалі згладжування z , який визначається залежно від теплотехнічних властивостей та розташування конструкції:

$$y(t) = \int_{t-z}^t x(\tau) d\tau. \quad (4.5)$$

Як і процес температури повітря $x(t)$, випадковий процес температури конструкції $y(t)$ також буде квазістаціонарним, але матиме менші значення стандарту і ефективної частоти, а закон розподілу його ординати буде ближчим до нормального.

Згідно з відомими правилами інтегрування випадкових процесів [55], математичне сподівання інтеграла дорівнює математичному сподіванню вихідного процесу:

$$M_y(t) = M_x(t). \quad (4.6)$$

Дисперсія інтеграла від випадкового процесу визначається шляхом інтегрування кореляційної функції вихідного процесу. Виходячи з загальної формули [55] та вважаючи реалізацію випадкового процесу середньодобових температур повітря також згладженою при інтервалі $z = 1$ доба, можна отримати вираз для стандарту випадкового процесу температури конструкції:

$$S_y = \frac{S_x}{z} \sqrt{\frac{\alpha z + \exp(-\alpha z) - 1}{\alpha + \exp(-\alpha) - 1}}, \quad (4.7)$$

де S_x - стандарт випадкового процесу температури повітря;
 α - параметр нормованої кореляційної функції випадкового процесу температури повітря;
 z - інтервал згладжування процесу температури повітря.

Розглядаючи дискретну послідовність ординат випадкового процесу температури повітря $x(t)$ з інтервалом квантування $d = 1$ доба та цілі значення інтервалів згладжування z , можна визначити першу кореляцію ρ_y та ефективну частоту ω_y згладженого процесу температури конструкції $y(t)$:

$$\rho_y = [z - 1 + \exp(-\alpha z)] / z \quad (4.8)$$

$$\omega_y = \sqrt{\frac{2}{z} [1 - \exp(-\alpha z)]} \quad (4.9)$$

Характер зміни статистичних характеристик у результаті згладжування при переході від процесу температури повітря до температури конструкції проілюстрований рисунком 4.6. При зростанні інтервала згладжування z стандарти та ефективні частоти зменшуються внаслідок більшої стабільності процесу температури конструкції. Відповідне зростання відношення ρ_y/ρ вказує на тіснішу автокореляцію процесу температури конструкції порівняно з процесом температури повітря.

Наявність математичного сподівання, стандарта (4.7) та ефективної частоти (4.9) нормального квазістаціонарного випадкового процесу температури конструкції дозволяє обчислити кількість перевищень заданого детермінованого рівня Y протягом одного року за формулою:

$$\lambda(Y) = 0.16 \omega_y \int_0^{1 \text{ рік}} \exp \left\{ -\frac{[Y - M_y(t)]^2}{2 [S_y(t)]^2} \right\} dt \quad (4.10)$$

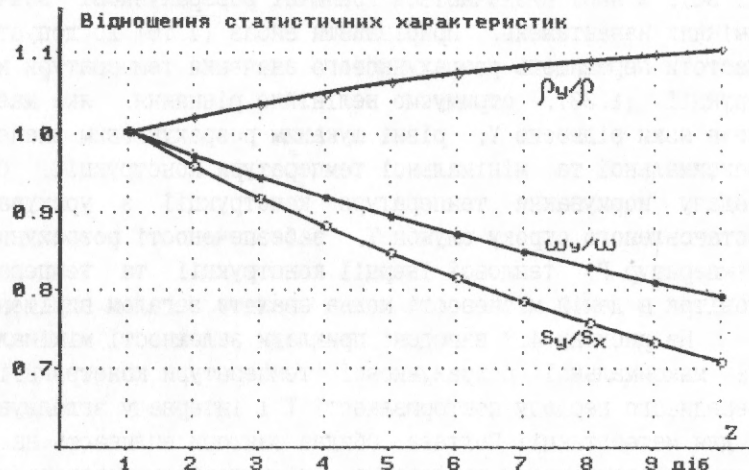


Рис. 4.6 Залежність статистичних характеристик температури конструкції від інтервалу згладжування

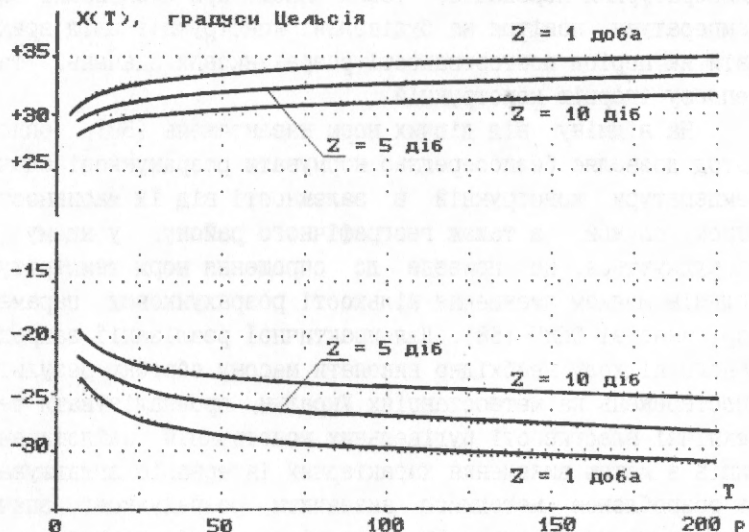


Рис. 4.7 Залежності розрахункових температур конструкцій від T та Z для метеостанції Полтава

Вираз (4.10) є конкретною реалізацією загальної формули (1.34), з якої визначаються граничні розрахункові значення змінних навантажень. Прирівнявши вираз (4.10) до допустимої частоти перевищень розрахункового значення температури конструкції (1.33), отримуємо нелінійне рівняння, яке має два розв'язки відносно Y , рівні шуканим розрахунковим значенням максимальної та мінімальної температури конструкції. Отже, задачу нормування температури конструкції з урахуванням встановленого строку служби T , забезпеченості розрахункових температур P , теплової інерції конструкції та температури повітря в даній місцевості можна вважати загалом вирішеною.

На рисунку 4.7 наведені приклади залежності мінімальної та максимальної розрахункової температури конструкції від середнього періоду повторюваності T і інтервалу згладжування Z для метеостанції Полтава. Обидва фактори впливають на значення розрахункових температур. Зміни періоду повторюваності від 5 до 100 років змінюють розрахункові температури на 20%. Зростання інтервалу згладжування внаслідок підвищення теплової інерції конструкцій приводить до зменшення розрахункових температурних перепадів. Таким чином, при нормуванні впливу температури повітря на будівельні конструкції слід враховувати як період повторюваності розрахункових значень, так і теплову інерцію конструкцій.

На відміну від діючих норм навантажень [58], описаний метод дозволяє безпосередньо нормувати розрахункові значення температури конструкцій в залежності від їх масивності та строку служби, а також географічного району, у якому вони споруджуються. Це приведе до спрощення норм температурних впливів шляхом зменшення кількості розрахункових параметрів порівняно зі СНІП [58]. Для практичної реалізації запропонованого підходу необхідно виконати масову обробку результатів спостережень на метеостанціях України, проаналізувати тепло-технічні властивості будівельних конструкцій найпоширеніших типів з метою виявлення характерних інтервалів згладжування, за розробленою методикою визначити розрахункові значення температур та виконати їх територіальне районування.

4.3. Методика нормування технологічних температур

Деякі цехи металургійного виробництва характеризуються систематичними виділеннями надлишкового тепла, які приводять до конвекційного та променевого нагрівання конструкцій і, як наслідок, - виникнення додаткових переміщень чи зусиль. Для дослідження технологічних температур використані результати експериментальних вимірювань, виконаних доцентом Магнітогорського гірничо-металургійного інституту Ю.О.Ананьїним протягом 80-х років і надані ним в розпорядження автора при виконанні роботи [1].

Вимірювання виконувалися в чотирьох цехах Магнітогорського металургійного комбінату, перелічених в таблиці 4.4. Датчики температури наклеювалися на поверхні сталевих підкранових балок і колон, що забезпечило безпосереднє вимірювання температури конструкцій, а не середовища. У кожному цеху встановлювалося 15 - 18 термодатчиків: рівномірно по висоті колони та по перерізові підкранової балки у зоні найбільшого нагрівання, а також на стінках підкранових балок вздовж усього цеху. Схема розміщення датчиків в одному з цехів показана на рисунку 4.8. Температури реєструвалися автоматично протягом 60 годин з інтервалом 30 хвилин. Таким чином отримані реалізації випадкового процесу зміни температури конструкцій, кожна з яких складається зі 120 ординат при інтервалі квантування 0.5 години. Характерні приклади отриманих реалізацій наведені на рисунку 4.9.

Таблиця 4.4

Перелік результатів вимірювання технологічних температур

Цехи	Сезон	Точок	Позначення
Відділення роздягання зливків	літо	18	ВР-л
Відділення роздягання зливків	зима	18	ВР-з
Склад заготовок прокатного цеху	літо	18	СЗ-л
Склад заготовок прокатного цеху	зима	18	СЗ-з
Відділення нагрівання зливків	літо	15	ВН
Склад слябів	літо	16	СС

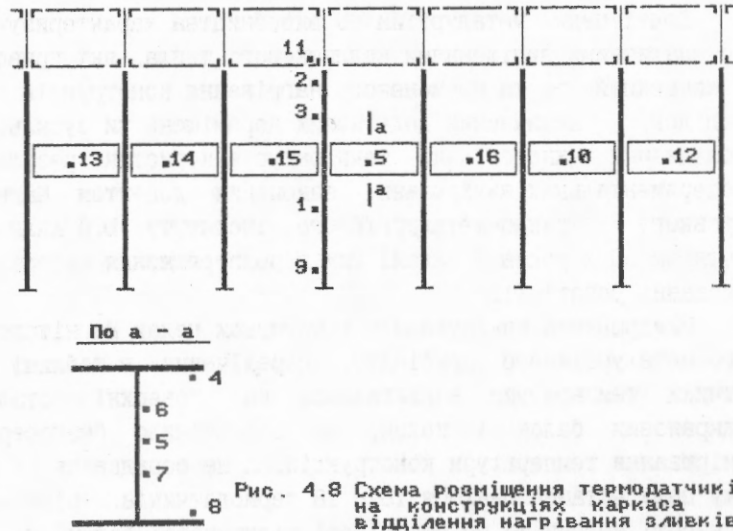


Рис. 4.8 Схема розміщення термодатчиків на конструкціях каркаса відділення нагрівання злиwkів

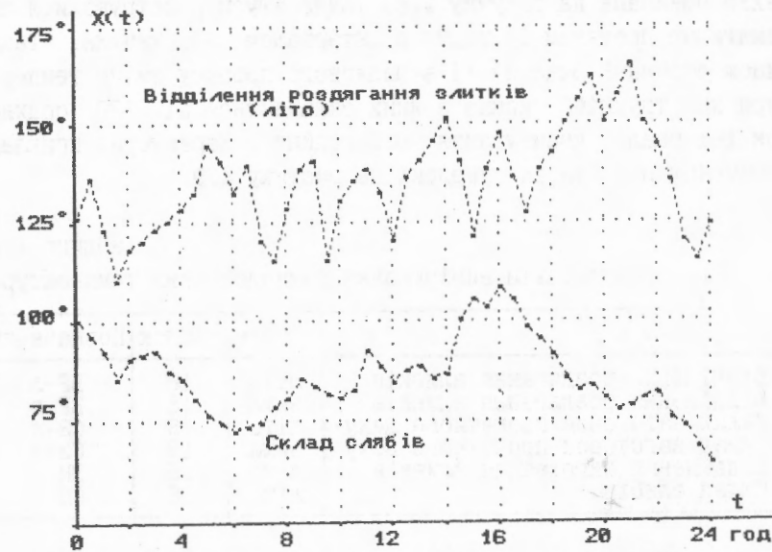


Рис. 4.9 Характерні реалізації випадкових процесів технологічних температур сталевих конструкцій

Перші результати статистичного аналізу отриманих даних опубліковані в [1], де доказано, що випадковий процес температури конструкцій є нормальним і стаціонарним, а довжина наявних реалізацій достатня для визначення його статистичних характеристик. Для подальшого дослідження з даних кожного цеху відібрана одна реалізація, записана на стінці підкранової балки в зоні найбільшого нагрівання (по типу точки 5 з рисунка 4.8). Результати статистичної обробки цих реалізацій наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Статистичні характеристики процесів зміни технологічних температур сталевих конструкцій

Цехи	M град.	S град.	V	ρ	α 1/год	ω 1/год
ВР-л	126.5	14.3	0.113	0.715	0.472	1.51
ВР-з	78.2	19.3	0.246	0.751	0.583	1.41
СЗ-л	183.2	28.5	0.155	0.801	0.576	1.26
СЗ-з	143.1	29.7	0.207	0.873	0.511	1.01
ВН	87.3	12.5	0.143	0.824	0.725	1.18
СС	88.6	17.4	0.196	0.905	0.434	0.87

Порівняно невеликі значення коефіцієнтів варіації V та вигляд гістограм розподілу, одна з яких показана на рисунку 4.10, вказують на можливість застосування розподілу Гаусса. З наведених в таблиці 4.5 значень першої кореляції ρ видно, що ординати наявних реалізацій сильно корельовані. Перевірка розріджених вибірок за критерієм узгодженості Пірсона [7], [8] показала, що розподіл Гаусса узгоджується з дослідними даними на рівнях значимості, не нижчих за 0.05.

Нормовані кореляційні функції випадкових процесів температури, одна з яких зображена на рисунку 4.11, задовільно апроксимуються експонентами (1.7) з показниками α , вказаними в таблиці 4.5. Оцінені за даними таблиці інтервали кореляції процесів температури конструкцій не перевищують двох годин, а ефективні періоди становлять 4 - 7 годин.

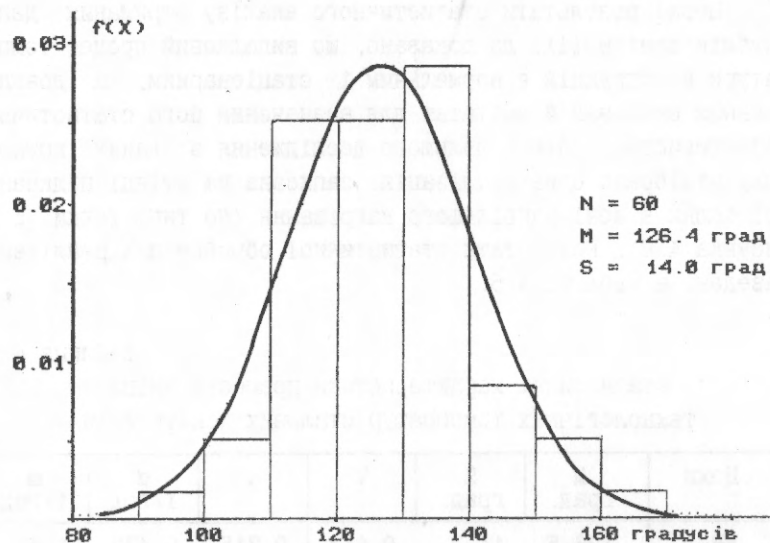


Рис. 4.10 Розподіл температури стінки підкранової балки у відділенні роздягання зливків (ВР-Л)

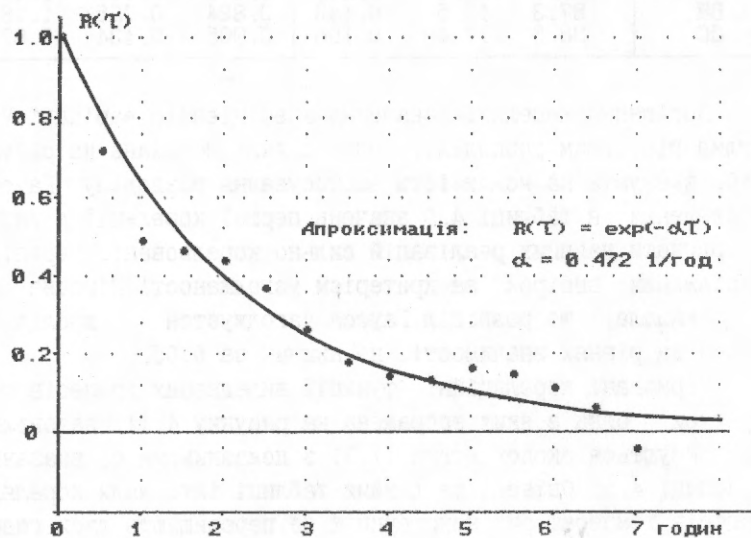


Рис. 4.11 Нормована кореляційна функція випадкового процесу температури підкран. балки (ВР-Л)

Порівняння наведених в таблиці 4.5 статистичних характеристик літніх та зимових записів температури показує, що їх математичні сподівання відрізняються на 40°C та 48°C. Такі перепади співпадають з можливими сезонними коливаннями температури повітря. Більші коефіцієнти варіації зимових температур можна пояснити меншими математичними сподіваннями та сильнішим охолодженням конструкцій. Для зимових записів характерні також менші значення ефективних частот.

Граничні та експлуатаційні розрахункові значення температури сталевих конструкцій обчислюються за формулами, наведеними в розділі 1. Оскільки методика натурального експерименту забезпечує безпосереднє вимірювання температури конструкцій, вирішена в попередньому підрозділі проблема переходу від температури повітря до температури конструкції з урахуванням теплової інерції останньої не існує і розрахункові значення можна обчислювати безпосередньо за характеристиками процесів температури, наведеними в таблиці 4.5.

Таблиця 4.6

Розрахункові значення технологічної температури стінок сталевих підкранових балок

Цехи	Граничні значення при строках служби T					
	5	10	20	40	80	120
ВР-Л	188.0	190.3	192.5	194.6	196.7	197.8
ВР-З	161.0	164.0	167.0	169.8	172.6	174.2
СЗ-Л	304.7	309.2	313.6	317.8	322.0	324.3
СЗ-З	268.1	272.9	277.5	282.0	286.4	288.8
ВН	140.4	142.4	144.3	146.2	148.0	149.0
СС	161.2	164.1	166.8	169.4	172.0	173.4
	Експлуатаційні значення при частках μ					
	0.2	0.1	0.05	0.01	0.001	0.00011
ВР-Л	138.5	144.8	150.0	159.8	170.7	179.7
ВР-З	94.4	102.9	110.0	123.1	137.8	150.0
СЗ-Л	207.2	219.7	230.1	249.5	271.3	289.2
СЗ-З	168.1	181.2	192.0	212.2	234.9	253.6
ВН	97.8	103.3	107.9	116.4	125.9	133.8
СС	103.2	110.9	117.2	129.1	142.4	153.3

Розрахункові значення технологічних температур стінок підкранових балок для шести згаданих вище цехів наведені в таблиці 4.6. З таблиці та ілюструючих її рисунків 4.12, 4.13 видно, що граничні розрахункові значення мало залежать від строку служби. Це пояснюється високими частотами процесу зміни температури, який встигає реалізувати свої максимальні значення навіть при невеликих строках служби. Експлуатаційні розрахункові значення завжди менші від граничних. Загалом наведені в таблиці 4.6 дані свідчать, що технологічні температури можуть досягати досить великих значень і виявляти значний вплив на роботу несучих конструкцій каркасів цехів металургійного виробництва.

За отриманими статистичними характеристиками оцінені також циклічні розрахункові значення технологічних температур несучих конструкцій. Верхні циклічні значення близькі до експлуатаційних розрахункових значень $Q_e(0.1)$, а нижні дещо менші від $Q_e(0.4)$. Частота циклічних значень змінюється від 3 до 6 завантажень на добу, що може обумовлюватися періодичністю технологічних процесів в обстежених цехах.

Просторовий розподіл температури по конструкціях каркаса проаналізований на прикладі відділення нагрівання зливків Магнітогорського металургійного комбінату. Схема розміщення термодатчиків у цьому цеху наведена на рисунку 4.8, а реалізація температури для точки 5 позначалася вище, як "ВН".

На рисунку 4.14 відображено розподіл технологічної температури стінок підкранових балок вздовж цеху. Математичне сподівання, експлуатаційне та граничне розрахункові значення досягають найбільших величин в точках 5 і 15, зменшуючись по мірі віддалення до торців цеху. Такий характер розподілу температур пов'язаний з інтенсивностями використання печей та напрямком транспортування нагрітих зливків. Коефіцієнти кореляції між температурами різних точок показують, що їх можна вважати взаємно незалежними. Це пояснюється локальним характером джерел технологічного тепла: нагрівальні печі працюють незалежно одна від одної. В інших цехах (наприклад, у відділенні роздягання зливків) температура конструкцій,

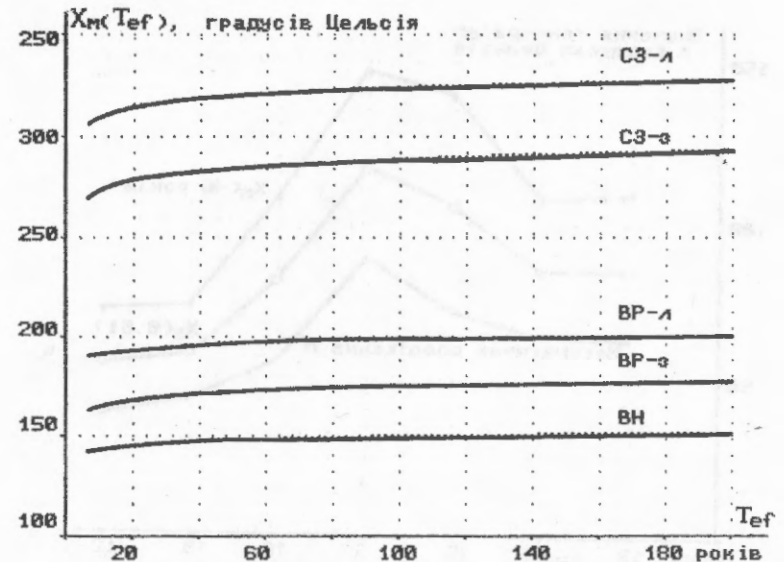


Рис. 4.12 Граничні розрахункові значення температури

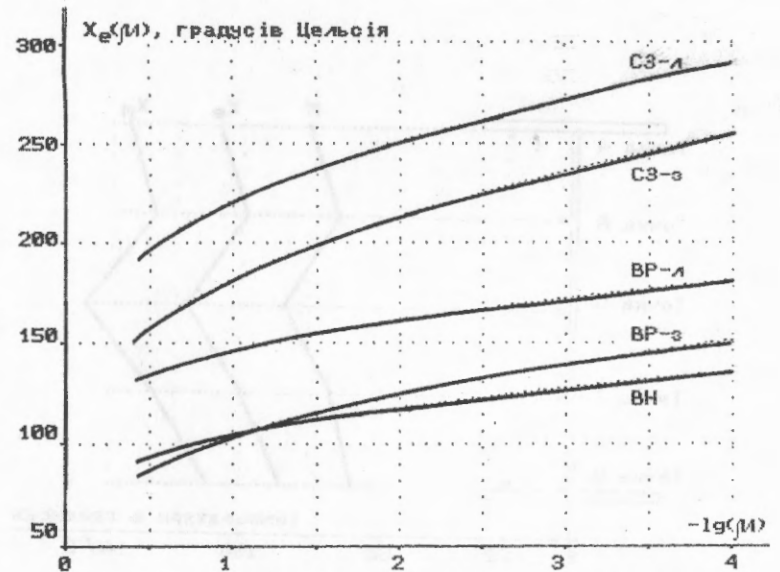


Рис. 4.13 Експлуатаційні розрахункові значення технологічної температури конструкцій

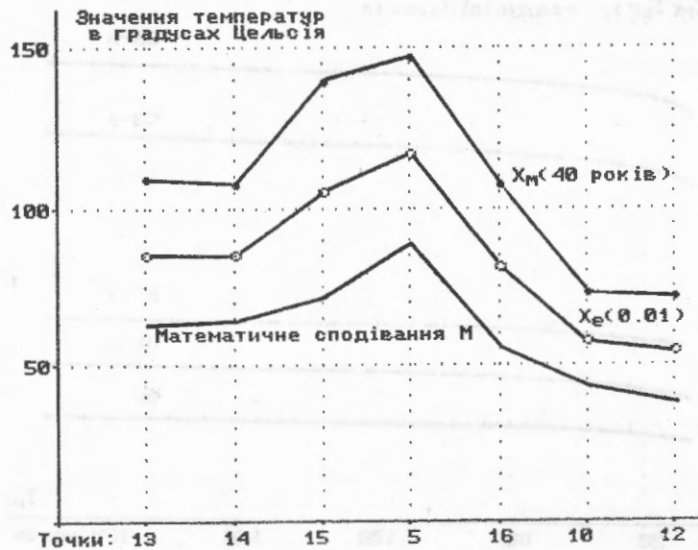


Рис. 4.14 Розподіл технологічних температур вздовж відділення нагрівання зливків - ВН

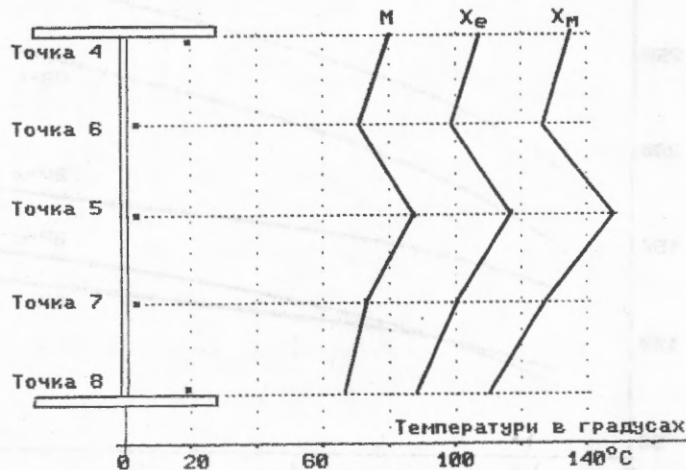


Рис. 4.15 Розподіл технологічних температур по висоті підкранової балки - ВН

розміщених в різних точках по довжині цеху, може змінюватися синхронно внаслідок одночасного нагрівання від вагонеток з гарячими зливками. У такому випадку корельованість температур повинна враховуватися при визначенні поздовжніх температурних деформацій каркаса.

Характер розподілу температури по висоті підкранової балки зображений на рисунку 4.15. Найсильніше нагрівається середина стінки та нижня полицка балки. Менший нагрів нижньої частини стінки можна пояснити тим, що вона затінюється від впливу променевого тепла нижньою полицкою балки. Температури окремих точок балки досить тісно корельовані (коефіцієнти кореляції $R > 0.75$), що слід враховувати при визначенні температурних деформацій та напружень в підкранових балках гарячих цехів.

Виконані дослідження показали, що запропонована в [1] модель нормального стаціонарного диференційовного процесу дозволяє нормувати розрахункові значення температур, які виникають внаслідок виділення надлишкового технологічного тепла в цехах металургійного виробництва. Досить високі значення технологічних температур, отримані вище за вибірковими даними, вказують на необхідність детального їх вивчення та нормування, для чого необхідно:

- провести натурні експериментальні дослідження температур конструкцій в цехах, де є виділення технологічного тепла;
- обробити та узагальнити результати натурних досліджень з метою характеризації температурних режимів різних цехів та нормування розрахункових значень технологічних температур;
- всебічно проаналізувати вплив технологічних температур на роботу конструктивних елементів та каркасів промислових будівель у цілому з метою удосконалення рекомендацій по їх проектуванню.

Такі дослідження дозволять уточнити допустимі розміри температурних блоків, окреслити області раціонального застосування статично невизначених конструкцій, покращити способи захисту конструкцій від впливу технологічних температур.

4.4. Особливості нормування вертикальних навантажень від мостових кранів

Нормуванню вертикальних та горизонтальних навантажень від мостових кранів присвячена велика кількість досліджень, у яких на основі експериментальних спостережень в реальних цехах отримані статистичні характеристики процесів кранових навантажень та встановлені їх розрахункові значення. Нижче розглянуті деякі особливості імовірнісного подання процесу вертикального навантаження від мостових кранів та обчислення його розрахункових значень. Для цього використані результати експериментальних досліджень, узагальнені в роботі [20].

Мостові крани створюють змінне повторне навантаження на будівельні конструкції, яке повинно характеризуватися трьома розрахунковими значеннями: граничним, експлуатаційним та циклічним. Найбільш обґрунтована та інформаційно забезпечена імовірнісна модель вертикального кранового навантаження у формі нормального стаціонарного диференційовного випадкового процесу, яка й використовується нижче. В [67] показано, що розподіли максимальних значень кранового навантаження мають дуже малі коефіцієнти варіації. З формули (1.4) видно, що в такому випадку необхідний рівень забезпеченості граничного розрахункового значення близький до нуля. Це спонукає нормувати кранове навантаження за середнім періодом повторюваності, вважаючи його рівним встановленому строкові служби конструкцій: $T = T_m$.

Граничне розрахункове значення вертикального навантаження від мостових кранів визначається за формулою (1.38), яку зручно записати у вигляді:

$$Q_m = M + S \sqrt{2 \ln(365 n T)} \quad (4.11)$$

де M і S - математичне сподівання і стандарт розподілу ординати випадкового процесу кранового навантаження;
 n - частота, рівна кількості наскрізних проїздів крана по конструкції протягом однієї доби.

Експлуатаційне розрахункове значення кранового навантаження обчислюється за формулою (1.47). Параметри циклічного розрахункового значення визначаються за схемою середніх амплітуд, яка приводить до формул:

$$Q_{min} = M - 1.253 S; \quad Q_{max} = M + 1.253 S; \quad n_c = n. \quad (4.12)$$

де M , S та n - математичне сподівання, стандарт та частота випадкового процесу кранового навантаження.

Таким чином, обчислення розрахункових значень вертикального навантаження від конкретного мостового крана не викликає ніяких труднощів, а проблема нормування зводиться до узагальнення результатів з урахуванням різноманітних кранів, працюючих в різних технологічних умовах. Аналіз результатів експериментально-статистичних досліджень вертикального кранового навантаження показав, що мостові крани доцільно об'єднати у групи відповідно до технологічних умов їх експлуатації.

Таблиця 4.7
 Статистичні характеристики вертикального навантаження для груп мостових кранів

Перелік виробництв та типів кранів	Значення	M	S	n 1/добу
1. Розливочні та ливарні крани	середні максим.	0.394 0.514	0.084 0.116	280 391
2. Механообробні, складальні та пресові цехи	середні максим.	0.364 0.447	0.082 0.114	250 389
3. Відділення підготовки ливарних форм, нагрівання і роздягання злитків	середні максим.	0.392 0.483	0.083 0.098	833 978
4. Склади заготовок прокатних і ковальсько-пресових цехів	середні максим.	0.515 0.600	0.071 0.102	1230 1950
5. Склади готової продукції прокатних цехів	середні максим.	0.443 0.549	0.086 0.118	586 720

Розподіл на групи виконувався з урахуванням видів технологічних операцій, які в основному виконують крани, та співвідношення основних статистичних характеристик процесу навантаження. Виділено п'ять груп виробництв, де працюють мостові крани з гнучким захватом вантажу. В таблиці 4.7 наведено перелік цих груп, а також середні по групі та максимальні (з 90% забезпеченістю) значення основних статистичних характеристик процесу навантаження. Математичне сподівання M та стандарт S виражені в долях від номінального навантаження одного крана, а частота n дорівнює частоті наскрізних проїздів крана вздовж підкранової конструкції.

Для кожного з розглянутих кранів за вказаними вище формулами обчислені експлуатаційні Q_e , граничні Q_m та циклічні розрахункові значення вертикального навантаження. Для кожної групи визначені узагальнені характеристики з 90% забезпеченістю: верхня довірча межа Q_e , Q_m і Q_{max} , а також нижня довірча межа для Q_{min} . Отримані таким чином залежності $Q_e(\mu)$ та $Q_m(T)$ апроксимовані аналітичними виразами

$$Q_e = b_0 + b_1 \lg(\mu) + b_2 [\lg(\mu)]^2; \quad (4.13)$$

$$Q_m = b_3 + b_4 \ln(T), \quad (4.14)$$

параметри яких $b_0 \dots b_4$ для усіх п'яти груп мостових кранів наведені в таблиці 4.8. Формулу (4.13) для експлуатаційного розрахункового значення Q_e можна використовувати при частках строків служби $0.0001 < \mu < 0.4$.

Таблиця 4.8

Параметри розрахункових кранових навантажень

Групи кранів	Експлуатаційних			Граничних		Циклічних	
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	Q_{min}	Q_{max}
1	0.485	-0.162	-0.0150	1.020	0.0203	0.172	0.635
2	0.421	-0.124	-0.0092	0.886	0.0203	0.152	0.537
3	0.457	-0.150	-0.0146	0.954	0.0168	0.204	0.597
4	0.574	-0.130	-0.0112	1.041	0.0173	0.330	0.694
5	0.517	-0.170	-0.0160	1.090	0.0206	0.234	0.675

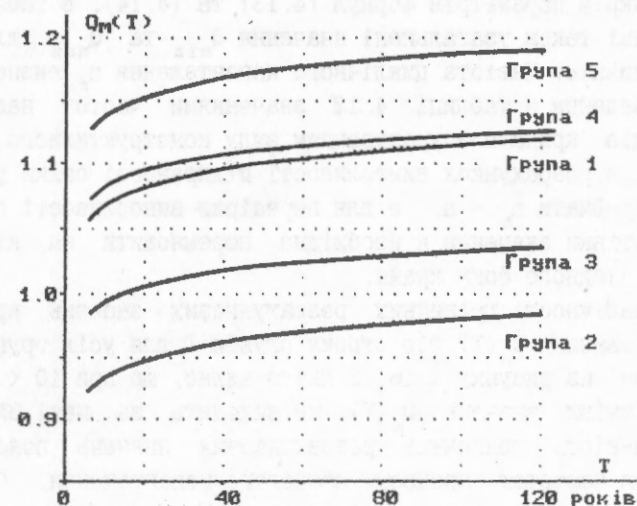


Рис. 4.16 Граничні розрахункові значення кранового навантаження

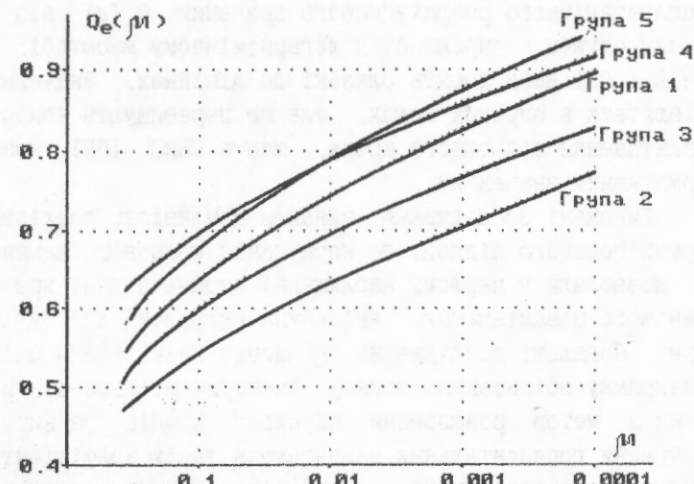


Рис. 4.17 Експлуатаційні розрахункові значення вертикального кранового навантаження

Окрім параметрів формул (4.13) та (4.14), в таблиці 4.8 наведені також узагальнені значення Q_{\min} та Q_{\max} для усіх груп кранів. Частота циклічного навантаження n_c визначається за наведеним в таблиці 4.12 значеннями частот наскрізних проїздів крана n з урахуванням виду конструктивного елемента. При розрахунках виносливості підкранової балки у цілому слід приймати $n_c = n$, а для перевірки виносливості верхньої зони стінки значення n необхідно перемножити на кількість коліс з одного боку крана.

Залежності граничних розрахункових значень кранового навантаження $Q_m(T)$ від строку служби T для усіх груп кранів наведені на рисунку 4.16. З нього видно, що при $10 < T < 120$ років зміни значень $Q_m(T)$ не виходять за межі 6%. Така стабільність граничних розрахункових значень пояснюється високою частотою процесу кранового навантаження. Оскільки усі використані статистичні характеристики задані в частках від номінального навантаження одного крана, отримані $Q_m(T)$ приблизно відповідають коефіцієнтам надійності за крановим навантаженням [58]. На рисунку 4.17 зображені залежності експлуатаційного розрахункового значення $Q_e(\mu)$ від частки строку служби, вираженої у логарифмічному масштабі: $-\lg(\mu)$. При $\mu < 0.1$ вони досить близькі до лінійних. Значення $Q_e(\mu)$ змінюються в широких межах, але не перевищують номінального навантаження від одного крана, яке в СНиП [58] вважається нормативним значенням.

Виконані дослідження виявили можливість реалізації диференційованого підходу до нормування кранового навантаження та дозволили у першому наближенні отримати дані про частоту кранового навантаження, які можна включити до будівельних норм. Подальші дослідження кранових навантажень слід вести в напрямку збільшення обсягу експериментально-статистичних даних з метою розширення переліку кранів та виробництв, уточнення горизонтальних навантажень та їх коефіцієнтів сполучення з вертикальними, а також нормування навантажень від підвісних та напівкозлових кранів.

4.5. Особливості нормування постійних навантажень від маси будівельних конструкцій

Постійне навантаження від маси будівельних конструкцій визначається, як сила тяжіння Землі, за формулою:

$$G = g h \rho_c \quad (4.15)$$

де: $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ - прискорення вільного падіння, яке в інженерних розрахунках можна вважати константою;

h - розмір конструкції, який при визначенні рівномірно розподіленого навантаження на покриття та перекриття дорівнює товщині шару, а при визначенні навантаження від окремої конструкції - її об'ємові;

ρ_c - середня густина матеріалу (далі - густина).

Згідно з класифікацією, наведеною в розділі 1, для постійних навантажень встановлюються експлуатаційне та граничне розрахункові значення. Експлуатаційне розрахункове значення G_e звичайно приймається рівним математичному сподіванню навантаження M_c . Вважаючи розподіл навантаження нормальним, граничне розрахункове значення можна визначити за формулою:

$$G_m = M_c + t_p S_c \quad (4.16)$$

де M_c і S_c - математичне сподівання і стандарт навантаження; t_p - квантиль нормованого нормального розподілу, що відповідає необхідній забезпеченості P .

При розробці СНиП 2.01.07-85 [58] нормативне значення постійного навантаження приймалося рівним математичному сподіванню, а розрахункове визначалося з забезпеченістю близько 0.98, що дає $t_p = 2$. З урахуванням встановлених СНиП коефіцієнтів надійності за навантаженням $1.05 < \gamma_n < 1.3$ за формулою (4.16) легко встановити, що при розробці норм враховувалися значення коефіцієнтів варіації постійного навантаження в межах від 0.025 до 0.15. Результати натурних досліджень [9] свідчать, що реальні значення коефіцієнтів варіації постійного навантаження від маси конструкцій можуть

бути значно більшими. Це вказує, що встановлені у СНиП [58] розрахункових значень постійних навантажень у ряді випадків занижені порівняно з реальними даними.

Виконані дослідження, основні результати яких викладені нижче, дозволяють запропонувати дві схеми нормування граничних розрахункових значень постійного навантаження G_m :

- 1) визначення G_m через експлуатаційне розрахункове значення G_e та коефіцієнт надійності γ_r ;
- 2) визначення G_m як добутку граничних значень розміру конструкції H_m та густини матеріалу ρ_m .

При застосуванні першої схеми, яка є аналогом діючих СНиП [58], експлуатаційне розрахункове значення постійного навантаження дорівнює добутку математичних сподівань густини матеріалу M_c та розміру конструкції M_n :

$$G_e = M_c M_n . \quad (4.17)$$

Граничне розрахункове значення постійного навантаження визначається шляхом множення експлуатаційного розрахункового значення G_e на коефіцієнт надійності за навантаженням γ_r :

$$G_m = G_e \gamma_r . \quad (4.18)$$

Коефіцієнт надійності γ_r залежить від заданої забезпеченості розрахункового значення P , коефіцієнтів варіації розміру конструкції V_n та густини матеріалу V_c , а також виду закону розподілу добутку розміру та густини, який може відрізнитися від нормального. Проектом ДБН [13] рекомендовано приймати імовірність перевищення граничного розрахункового значення постійного навантаження у 100 разів меншою від імовірності перевищення граничного значення. Останнє дорівнює математичному сподіванню навантаження і має забезпеченість, близьку до 0.5. Тоді забезпеченість граничного розрахункового значення повинна дорівнювати $P = 0.995$. Розрахунки показують, що такі значення будуть набагато перевищувати розрахункові постійні навантаження, встановлені діючими СНиП [58]. З точки зору спадкоємності норм краще встановити $P = 0.99$.

Обчислена методом Монте-Карло залежність коефіцієнта надійності за призначенням γ_r від коефіцієнтів варіації розміру конструкції V_n та густини матеріалу V_c при $P = 0.99$ зображена на рисунку 4.18 у вигляді ліній рівня. З рисунка видно, що коефіцієнт надійності зростає при збільшенні V_n та V_c , досягаючи досить великих значень, що виходять за рамки діючих норм [58].

Недоліком такого підходу є залежність коефіцієнта надійності γ_r одразу від двох факторів: типу конструкції та виду матеріалу. Для спрощення нормування можна згрупувати матеріали за значеннями коефіцієнтів варіації густини, а конструкції за значеннями коефіцієнтів варіації характерного розміру.

Друга схема нормування постійного навантаження передбачає встановлення в нормах навантажень експлуатаційних та граничних значень густин матеріалів і характерних розмірів конструкцій. Експлуатаційні значення ρ_e та h_e дорівнюють відповідним середнім значенням: $\rho_e = M_c$; $h_e = M_n$. Граничні значення ρ_m та h_m є квантилями нормальних розподілів відповідних характеристик, визначеними згідно з формулою (4.16). Тоді експлуатаційне G_e та граничне G_m розрахункові значення постійного навантаження дорівнюють

$$G_e = \rho_e H_e ; \quad G_m = \rho_m H_m . \quad (4.19)$$

Граничні значення густини ρ_m та товщини h_m встановлюються такими, щоб їх добуток відповідав заданій забезпеченості P граничного розрахункового значення постійного навантаження від маси конструкції G_m . Для цього методом випадкового пошуку визначені забезпеченості значень ρ_m та h_m таким чином, щоб вони залежали лише від статистичних характеристик густини та товщини, урахували вид розподілу їх добутку, але при цьому були взаємно незалежними. Знайдені таким чином квантилі t_p для ряду значень V_n , V_c та забезпеченості граничних значень постійного навантаження P наведені на рисунку 4.19. Вони використовуються для нормування граничних розрахункових значень густини ρ_m та товщини h_m за формулою (4.16).

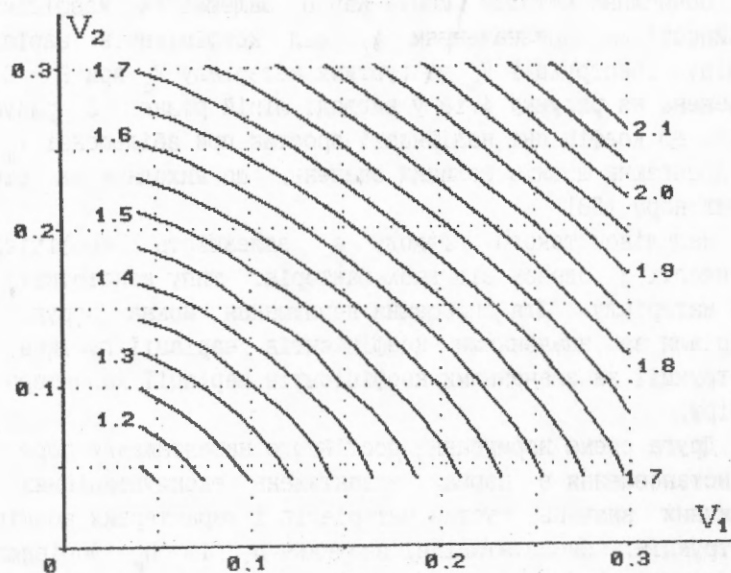


Рис. 4.18 Залежність коефіцієнта надійності при $P=0.99$ від варіації товщини і густини матеріалу

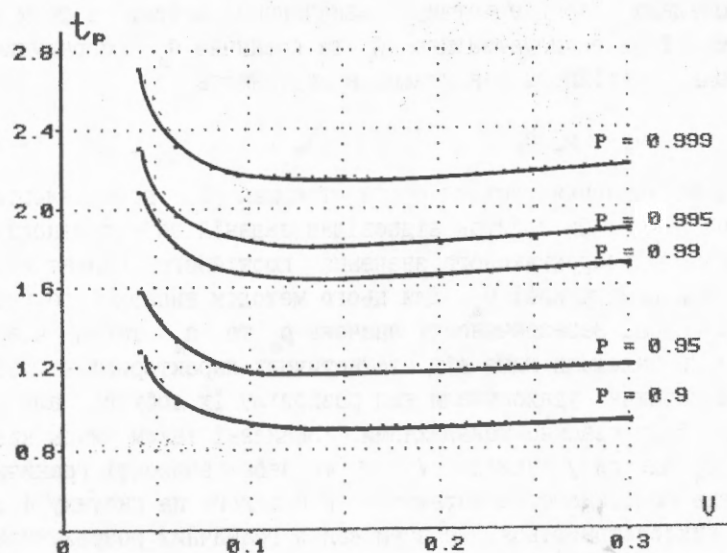


Рис. 4.19 Залежність забезпеченостей товщини і густини від їх варіації та забезпеченості навантаження

Для розробки норм можна рекомендувати одну з описаних вище схем нормування постійного навантаження. Якщо перший підхід близький до діючих норм [58], то другий зручніший при запровадженні нових будівельних матеріалів та конструкцій. Для цього в нормах досить визначити правила обчислення експлуатаційних та граничних значень густини матеріалів та розмірів конструкцій за наявними статистичними даними.

В роботах [9], [25] показано, що вага покриттів має просторову мінливість, обумовлену випадковими змінами товщин ізолюючих шарів по поверхні покритті. Її урахування можливе з використанням імовірнісної моделі нормального ізотропного стаціонарного випадкового поля $q(x, y)$, яке має математичне сподівання M_q , стандарт S_q та нормовану кореляційну функцію $R_q(d)$. Статистичні характеристики полів постійних навантажень оцінені за результатами натурних обстежень трьох об'єктів, вказаних в таблиці 4.9. Розподіли ординати усіх трьох полів постійного навантаження узгоджуються з законом Гауса. Коефіцієнти варіації $0.20 < V_q < 0.23$ перевищують значення, що враховувалися при розробці СНиП [58], а тому фактична забезпеченість визначених згідно СНиП розрахункових навантажень зменшується приблизно до 0.9. Нормовані кореляційні функції досліджених полів постійних навантажень описуються експонентами (1.7), параметри яких α наведені в останній колонці таблиці 4.9.

Таблиця 4.9

Результати статистичної обробки полів постійних навантажень

Дані	N	M_q , кПа	S_q , кПа	V_q	α
1	13	2.625	0.535	0.204	0.267
2	21	6.593	1.526	0.232	0.726
3	142	0.926	0.214	0.231	0.369

Перелік даних:
 1 Покрівля цеху Бобруйського шинного заводу (без з/б плит)
 2 Покрівля цукрозаводу в с.м.т. Білики Полтавської області
 3 Асфальтна стяжка на житловому будинку в м. Полтава

Автори роботи [9] шляхом натурального обстеження плит та ізолюючих шарів прокриттів промислових будівель встановили, що в розрахунках плит слід враховувати більші навантаження, ніж в розрахунках ферм. Це пояснюється тим, що конструкція з малими розмірами вантажної поверхні може цілком потрапити на зону з максимальними товщинами ізолюючих шарів, а при збільшенні вантажної поверхні відбувається осереднення постійного навантаження в межах вантажної поверхні. Виконаний вище опис постійного навантаження у вигляді нормального ізотропного випадкового поля дозволяє обґрунтовано визначити розрахункові значення постійного навантаження з урахуванням розмірів вантажної поверхні конструкції.

Рівномірно розподілене навантаження на конструкцію визначається шляхом інтегрування випадкового поля навантаження $q(x, y)$ в межах вантажної поверхні шириною B та довжиною L :

$$g(L, B) = \frac{1}{L \cdot B} \int_0^L \int_0^B q(x, y) dx dy \quad (4.20)$$

При фіксованих розмірах вантажної поверхні $L \cdot B$ інтеграл (4.20) від нормального випадкового поля є нормально розподіленою випадковою величиною. Виходячи з загальних формул [55] та викладених вище передумов, в роботі [25] отримані оцінки математичного сподівання M_g та стандарту S_g інтеграла (4.20). Їх підстановка до (4.16) дає робочу формулу для обчислення граничного розрахункового значення рівномірно розподіленого постійного навантаження на покриття:

$$g(L, B) = M_q + \frac{t_p S_q}{\sqrt{1 + 0.4 \cdot (\alpha L + \alpha B) + 0.1 \cdot \alpha L \cdot \alpha B}} \quad (4.21)$$

де L, B - розміри вантажної поверхні конструкції;
 M_q, S_q, α - характеристики поля постійного навантаження;
 t_p - квантиль нормального розподілу, що відповідає забезпеченості розрахункового значення P .

За формулою (4.21) при $t_p = 2.576$, що відповідає забезпеченості $P = 0.995$, обчислена залежність розрахункового навантаження на покрівлю цеху Бобруйського шинного заводу від розмірів вантажної поверхні, яка зображена на рисунку 4.20 у вигляді ліній рівня. Розрахункове навантаження на плиту покрівлі розмірами 3×6 м становить $g = 3.58$ кПа, а на крокв'яну ферму з вантажною поверхнею розмірами 24×6 м - $g = 3.14$ кПа, тобто на 12% менше. При тій же забезпеченості розрахункове навантаження за формулою (4.16), яка відповідає максимуму навантаження в окремій точці покриття, дорівнює 4.00 кПа. Отже, адекватне урахування розмірів вантажної поверхні дозволяє зменшити граничні розрахункові значення постійного навантаження та витрати будівельних матеріалів.

Ще одна не врахована діючими нормами проектування [58] особливість постійного навантаження на конструкції покрівель полягає у його збільшенні в процесі експлуатації внаслідок зволоження теплоізоляційних шарів. Зволоження може проходити як при проникненні атмосферних опадів при аварійному порушенні щільності гідроізоляції, так і внаслідок неминучого в режимі нормальної експлуатації проникнення пари з середини будівлі крізь пароізолюючі шари. Натурні обстеження покрівель показали, що через декілька років експлуатації настає стаціонарний режим, при якому відносна вологість утеплювача дорівнює 15% - 25%. Така вологість перевищує нормативне значення 5%, при якому нормується середня густина теплоізоляційних матеріалів, а тому повинна враховуватися при визначенні постійного навантаження на покрівлю.

З метою оцінки впливу зволоження теплоізоляції на величину постійного навантаження від її маси розглянемо процес зволоження ізолюючого матеріалу, який має істинну густину ρ_0 та коефіцієнт щільності k . З визначення вологості та коефіцієнта щільності отримана формула для обчислення рівномірно розподіленого значення маси ізолюючого шару товщиною h :

$$G = \rho_0 h k (1 + W / 100) \quad (4.22)$$

де W - відносна вологість у відсотках.

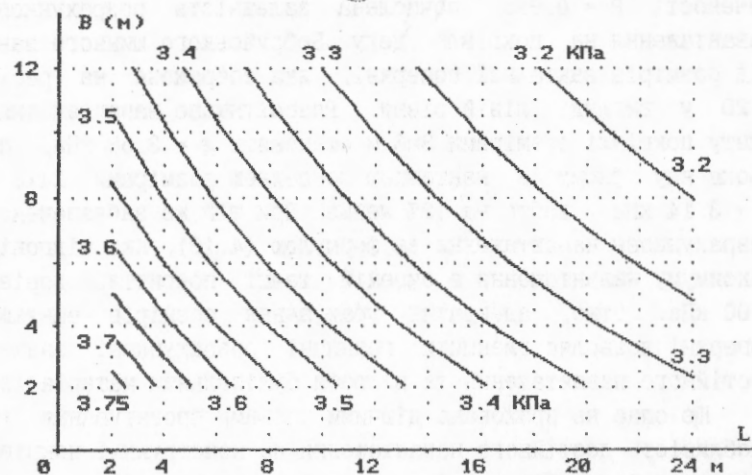


Рис. 4.20 Розрахункове навантаження на покриття цеху Бобрійського шинного заводу (КПа)

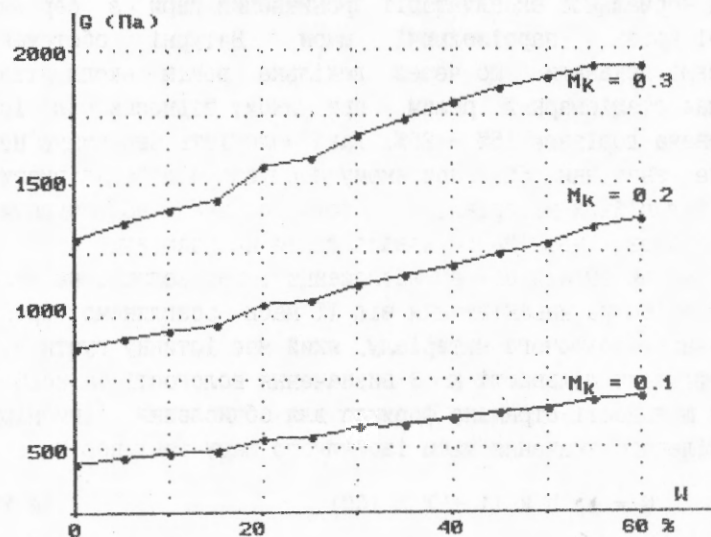


Рис. 4.21 Залежність розрахункового навантаження B від вологості W та щільності M_k матеріалу

У граничному випадку, який може виникнути в результаті аварійного протікання гідроізоляції, усі пори ізоляційного матеріалу повністю заповнюються водою. Якщо густина води $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$, максимально можлива вологість дорівнює

$$W_{\max} = 100 \rho_B (1 - k) / (\rho_0 k) \quad (4.23)$$

а оцінку зверху для маси теплоізоляції:

$$G_{\max} = h [\rho_B + k (\rho_0 - \rho_B)] \quad (4.24)$$

Вплив зволоження теплоізоляції на розрахункове значення постійного навантаження від її маси проаналізований на прикладі теплоізоляції, виконаної з мінераловатних плит різної щільності при номінальній товщині 10 см. Орієнтовні значення статистичних характеристик фізичних параметрів наведені в таблиці 4.10. Варіанти характеристик коефіцієнта щільності відповідають різним маркам мінераловатних плит.

Таблиця 4.10

Статистичні характеристики фізичних параметрів мінераловатної теплоізоляції

Фізичні характеристики	Позначення	Одиниці виміру	Числові характеристики		
			M	S	V
Товщина теплоізоляції	h	метри	0.10	0.01	0.100
Істинна густина	ρ_0	кг/м ³	2600	100	0.038
Коефіцієнт щільності	k ^o	-	0.10	0.02	0.200
	k	-	0.20	0.04	0.200
	k	-	0.30	0.06	0.200

Усі аргументи формул (4.22), (4.23) та (4.24) можна вважати нормально розподіленими випадковими величинами. Шляхом статистичного моделювання за формулою (4.22) при ряді детермінованих значень вологості отримані залежності граничного розрахункового значення постійного навантаження G_m від вологості та коефіцієнта щільності утеплювача. З рисунка 4.21 видно, що при вологості $W < 60\%$ ці залежності близькі до лінійних. Подальше збільшення вологості може привести до

повного насичення пор теплоізолюючого матеріалу водою. При цьому залежності G від W стають нелінійними, наближаючись до деякої горизонтальної асимптоти. Перехід від нормативної вологості $W = 5\%$ до реального значення $W = 20\%$, виявленого при натурних обстеженнях покрівель, збільшує розрахункові навантаження приблизно на 15%.

Навантаження від G_{\max} маси теплоізолюючого матеріалу, повністю насиченого водою, також обчислені методом статистичного моделювання з використанням формул (4.23) та (4.24). З рисунка 4.21 видно, що вони можуть досягнути значень, які в 1.3 - 2.8 рази перевищують розрахункові навантаження при звичайній вологості $W = 20\%$ і привести до значного перевантаження несучих конструкцій покриття.

Виявлені співвідношення вказують на те, що при нормуванні постійного навантаження потрібно враховувати реальні значення вологості теплоізоляційних матеріалів, які фактично досягаються в стаціонарному режимі експлуатації. Випадок повного насичення водою у результаті порушення працездатності гідроізоляційного покриття слід розглядати як аварійну ситуацію, а навантаження від маси насиченої водою теплоізоляції необхідно віднести до розряду аварійних.

Розділ 5. УРАХУВАННЯ СУМІСНОЇ ДІЇ ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розрахункові значення змінних навантажень відповідають максимумам випадкових процесів, які реалізуються дуже рідко і діють протягом короткого часу. Одночасна реалізація таких максимумів при дії на конструкцію декількох навантажень є подією малоімовірною. Коли одне з навантажень досягає максимуму, інші звичайно приймають значення, ближчі до середніх, внаслідок чого сумарне зусилля в конструкції завжди менше суми розрахункових зусиль від дії окремих навантажень. Цей ефект враховується коефіцієнтами сполучення, які знижують сумарні розрахункові зусилля в конструкції від дії декількох змінних навантажень.

Норми проектування [10], [58], [70] використовують два підходи до урахування сумісної дії навантажень. При застосуванні спільного коефіцієнта сполучення ψ сумарне розрахункове зусилля в елементі чи розрахунковому перерізі конструкції визначається за формулою:

$$N = \psi \sum N_i, \quad (5.1)$$

де N_i - розрахункове зусилля від дії i -того навантаження.

При використанні роздільних коефіцієнтів сполучення ψ_i сумарне розрахункове зусилля дорівнює

$$N = \sum \psi_i N_i. \quad (5.2)$$

У деяких випадках використовуються також більш складні ієрархічні структури, які включають і спільні, і роздільні коефіцієнти сполучення.

Спільний коефіцієнт сполучення ψ залежить від імовірнісних властивостей діючих навантажень та їх часток у складі сумарного зусилля. Досвід досліджень [32], [67] показав, що визначення долей навантажень при розрахунках на стійкість чи

складні види деформацій є нетривіальною і навіть досить складною задачею. Точне виконання проектного розрахунку конструкції може стати неможливим, бо для визначення часток навантажень необхідно мати переріз елемента.

Застосування роздільних коефіцієнтів сполучення ψ_1 та формули (5.2) слід вважати доцільним, якщо воно приводить до суттєвого спрощення процедури визначення часток навантажень. В ідеальному випадку кожному і-тому навантаженню відповідає власне значення коефіцієнта сполучення ψ_1 , яке враховується у формулі (5.2) незалежно від наявності інших навантажень. В єврокодї [70] та нормах деяких країн пропонуються набори значень ψ_1 з досить простими алгоритмами вибору, але велика їх кількість та залежність від виду конструкції викликають незручності при проектуванні.

Нижче наводяться результати нормування спільних коефіцієнтів сполучення навантажень від снігу, вітру і мостових кранів, діючих на промислові та цивільні будівлі. При цьому використані власні дані [30], [32] та результати виконаних під керівництвом автора досліджень О.Г.Фенка [36], [67]. Коефіцієнти сполучення визначаються з умови рівнонадійності конструкцій, запроєктованих на дію одного та декількох навантажень. Як правило, обчислення проводяться у такому порядку:

1) розглядається елемент конструкції, зусилля в якому дорівнює лінійній комбінації діючих навантажень:

$$N = \psi \sum_{i=1}^K \alpha_i Q_i . \quad (5.3)$$

де Q_i - розрахункове значення і-того навантаження;

α_i - коефіцієнт впливу і-того навантаження;

K - кількість діючих навантажень;

2) відповідно до обраних моделей навантажень та формули (5.3), визначаються статистичні характеристики випадкового процесу сумарного зусилля в елементі конструкції;

3) виходячи з встановленої забезпеченості, обчислюються розрахункові значення Q_i кожного з діючих навантажень та сумарного внутрішнього зусилля в елементі N;

4) коефіцієнт сполучення обчислюється з формули (5.3) як відношення розрахункового значення сумарного внутрішнього зусилля до суми зусиль від розрахункових значень усіх діючих навантажень.

Розглядаючи елементи з різними коефіцієнтами впливу, можна отримати залежність коефіцієнта сполучення від часток навантажень C_i у складі сумарного внутрішнього зусилля. При урахуванні двох навантажень така залежність приймає форму увігнутої кривої, зображеної на рисунку 5.1 У випадку трьох навантажень отримуємо увігнуту поверхню, приклад якої наведений на рисунку 5.2 При частці одного з навантажень $C_i = 1$ коефіцієнт сполучення $\psi = 1$; в інших випадках $\psi < 1$.

В роботах [30], [32] запропонована методика обчислення коефіцієнтів сполучення навантажень, поданих у формі квазі-стаціонарних диференційовних процесів. За даними 70 метеостанцій України та деяких районів СРСР обчислені коефіцієнти сполучення зусиль від снігового, вітрового та кранового навантажень. Поряд з метеорологічними даними [23], [24], використані результати дослідження навантажень від мостових кранів [20]. Залежності коефіцієнтів сполучення від часток діючих навантажень описані зручними для використання аналітичними виразами. Результати досліджень [32] увійшли до нормативних документів [12], [51].

Точні імовірнісні моделі, використані в [30], приводять до складних обчислювальних процедур. В роботах [34], [36], [67], процеси снігового, вітрового та кранового навантажень подані у формі послідовностей максимальних значень. Шляхом порівняльного аналізу різних методів обчислення коефіцієнтів сполучення встановлено, що найточніші результати дає підхід, при якому кожне змінне навантаження описується послідовністю максимальних значень з періодом вибірки, кратним інтервалу

кореляції відповідного випадкового процесу. Виходячи з цього, снігове навантаження подане в формі послідовності річних максимумів, вітрове - місячних, а кранове - послідовністю трьохгодинних максимумів. Періодичність максимумів зусилля в елементі конструкції встановлена в [42], виходячи з розгляду кореляційної функції суми випадкових процесів навантажень.

Коефіцієнти сполучення навантажень від снігу, вітру та мостових кранів обчислені за даними 60 метеостанцій України та узагальненої імовірнісної моделі кранового навантаження [20]. В межах території України коефіцієнти сполучення змінюються несуттєво, а тому їх територіальне районування не має сенсу. Узагальнена в запас надійності залежність коефіцієнтів сполучення від часток снігового C_c , вітрового C_v та кранового C_k навантажень у складі сумарного зусилля в елементі конструкції апроксимована аналітичним виразом:

$$\psi = C_c^{1.405} + C_v^{1.442} + C_k^{0.931}. \quad (5.4)$$

Залежність (5.4), зображена на рисунку 5.2 лініями рівня, має вигляд увігнутої поверхні з мінімальним значенням $\psi = 0.74$. При урахуванні лише снігового та вітрового навантаження приймається $C_k = 0$, що дає увігнуту криву, наведену на рисунку 5.1. З рисунків видно, що урахування кранового навантаження не приводить до значного зменшення коефіцієнта сполучення. Пояснити це явище можна за результатами дослідження [35], де отримана орієнтовна оцінка знизу для коефіцієнта сполучення:

$$\psi > (0.8 V_c + 2.3) / (1.8 V_c + 2.3), \quad (5.5)$$

де V_c - сума коефіцієнтів варіації навантажень, що діють на конструкцію.

Невеликі коефіцієнти варіації максимумів кранового навантаження мало змінюють значення V_c , що й приводить до їх незначного впливу на величину коефіцієнта сполучення.

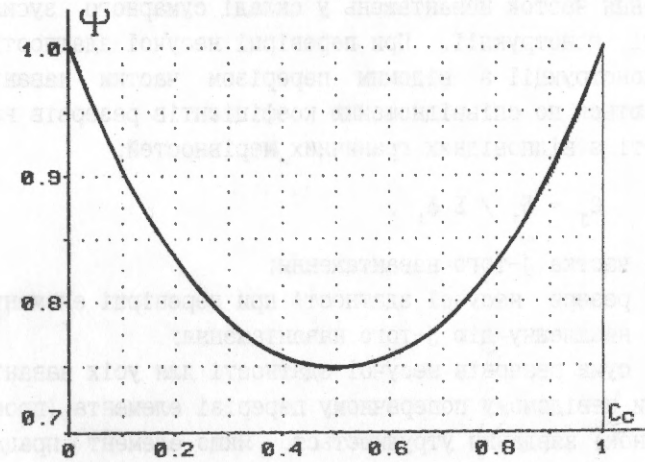


Рис. 5.1 Коефіцієнти сполучення зусиль від снігового та вітрового навантажень

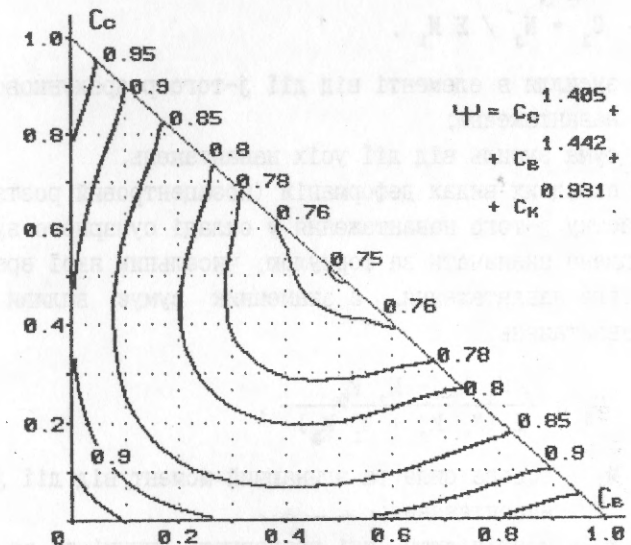


Рис. 5.2 Коефіцієнти сполучення зусиль від снігового, вітрового та кранового навантажень

В роботі О.Г.Фенка [67] детально проаналізовані способи визначення часток навантажень у складі сумарного зусилля в елементі конструкції. При перевірці несучої здатності елемента конструкції з відомим перерізом частки навантажень визначаються по співвідношенню коефіцієнтів резервів несучої здатності з відповідних граничних нерівностей:

$$C_j = \delta_j / \Sigma \delta_1 . \quad (5.6)$$

де C_j - частка j-того навантаження;

δ_j - резерв несучої здатності при перевірці елемента на незалежну дію j-того навантаження;

$\Sigma \delta_1$ - сума резервів несучої здатності для усіх навантажень.

При невідомому поперечному перерізі елемента (проектний розрахунок) завдання утруднюється. Якщо елемент працює на простий вид деформації (розтяг, стиск, згин), частка j-того навантаження дорівнює

$$C_j = N_j / \Sigma N_1 . \quad (5.7)$$

де N_j - зусилля в елементі від дії j-того розрахункового навантаження;

ΣN_1 - сума зусиль від дії усіх навантажень.

При складних видах деформацій (позацентричний розтяг чи стиск) частку j-того навантаження у складі сумарного зусилля рекомендовано визначати за формулою, чисельник якої враховує вплив j-того навантаження, а знаменник сумує впливи усіх діючих навантажень:

$$C_j = \frac{N_j k_r + M_j k_\phi}{\Sigma (N_1 k_r + M_1 k_\phi)} . \quad (5.8)$$

де N_j та M_j - осьова сила та згинаючий момент від дії j-того навантаження;

k_r та k_ϕ - коефіцієнти, які враховують гнучкість та форму поперечного перерізу елемента і визначаються за таблицями 5.1 та 5.2, складеними за [67].

Таблиця 5.1

Значення коефіцієнтів k_ϕ у формулі (5.8)

Конструкції	Прямокутн	Двотавр	Круг	Труба
Залізобетонні	6/h	4/h	8/h	8/(vh)
Сталеві	6/h	3/h	8/h	8/(vh)
Дерев'яні	6/h	-	8/h	-
Позначення:	$v = (1 + d^2 / h^2)$ h - висота перерізу d - внутрішній діаметр труби			

Таблиця 5.2

Значення коефіцієнтів k_r у формулі (5.9)

Конструкції	Прямокутн	Двотавр	Круг	Труба
Залізобетонні	1	1	0	0
Сталеві	1	1	1	1
Дерев'яні	1	-	1	-
Якщо хоча б для одного навантаження $N = 0$ або $M = 0$:				
Сталеві $\lambda < 80$	1.43	1.43	1.43	1.43
$80 < \lambda < 120$	2.22	2.22	2.22	2.22
$\lambda > 120$	3.33	3.33	3.33	3.33
Дерев'яні $\lambda < 70$	1.43	-	1.43	-
$70 < \lambda < 100$	2.50	-	2.50	-
$\lambda > 100$	4.55	-	4.55	-

При проектуванні конструкцій рекомендується орієнтовно визначити габарити поперечних перерізів елементів на етапі компоновки конструктивної схеми. Розрахункові зусилля в елементах обчислюються за формулою (5.3) з коефіцієнтом сполучення (5.4) та частками навантажень (5.7) чи (5.8). Якщо застосовувалася формула (5.8), то після визначення перерізу елемента слід уточнити значення коефіцієнта сполучення (5.4), обчисливши частки навантажень за формулою (5.6).

Розділ 6. ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

Методика використання отриманих результатів при проектуванні несучих конструкцій показана на прикладі розрахунку основних елементів сталеві поперечної рами складської будівлі, схема якої зображена на рисунку 6.1. Колони каркаса виконані з прокатних двотаврів, а несучою конструкцією покриття є зварна сталева балка. Покрівля із сталевого профільованого настилу по прогонах, на який укладені: пароізоляція, теплоізоляція з пінополістиролу, гідроізоляція з чотирьох шарів рубероїду та захисне гравійне покриття. За даними СНиП 2.01.07-85 [58], нормативне навантаження від ваги покриття складає 1.34 кПа, а розрахункове - 1.59 кПа. Крок поперечних рам - 6 м. Район будівництва - м. Полтава. Розрахунки виконані в двох варіантах: з урахуванням навантажень за діючими СНиП [58] та згідно з рекомендаціями розділів 2 і 3. Конструктивні розрахунки виконувалися згідно з вимогами СНиП II-23-81* [60]. За рекомендацією [13], строк служби складської будівлі прийнято рівним $T = 60$ років.

Розрахункові навантаження на каркас від снігу, вітру та маси покриття вказані в таблиці 6.1. Нормативні значення снігового та вітрового навантажень визначені за відповідними картами СНиП 2.01.07-85 [58], а розрахункові отримані шляхом множення на коефіцієнти надійності, в обох випадках рівні $\gamma_f = 1.4$. Граничне значення снігового навантаження обчислене за формулою (2.3) та картою 2.3, а вітрового - за формулою (3.5) та картою 3.2 для району Полтави при строковій службі $T = 60$ років. Експлуатаційні розрахункові значення наведені за картами 2.6 та 3.7 для частки строку служби конструкції $\mu = 0.01$. Постійне навантаження від покриття визначалося лише за СНиП 2.01.07-85 [58], а тому в подальших розрахунках експлуатаційне розрахункове значення приймалося рівним нормативному, а граничне - розрахунковому навантаженню за СНиП.

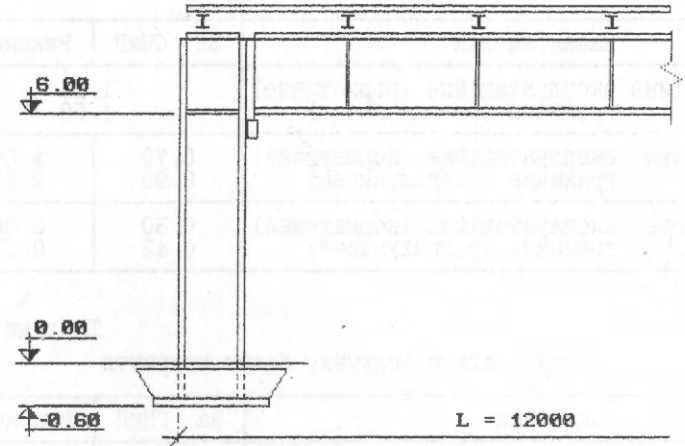


Рис. 6.1 Конструктивна схема поперечної рами

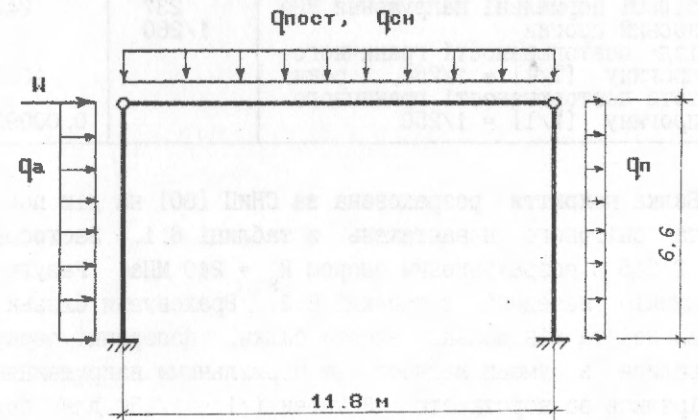


Рис. 6.2 Розрахункова схема поперечної рами

Таблиця 6.1

Навантаження на складську будівлю

Навантаження	За СНиП	Рекоменд.
Постійне експлуатаційне (нормативне) граничне (розрахункове)	1.34 1.59	
Снігове експлуатаційне (нормативне) граничне (розрахункове)	0.70 0.98	1.00 2.00
Вітрове експлуатаційне (нормативне) граничне (розрахункове)	0.30 0.42	0.08 0.50

Таблиця 6.2

Результати розрахунку балки покриття

Показники	За СНиП	Рекоменд.
Згинаючий момент: нормативний, КНм граничний (розрахунковий), КНм	220.3 227.6	387.7
Поперечний переріз в міліметрах	-550×6 2-160×10	-550×6 2-240×10
Момент інерції перерізу, см ⁴	33407	46220
Площа поперечного перерізу, см ²	65	81
Найбільші нормальні напруження МПа	237	240
Відносний прогин	1/260	
Період повторюваності граничного прогину [f/l] = 1/250, роки		10.5
Частота повторюваності граничного прогину [f/l] = 1/250		0.00095

Балка покриття розрахована за СНиП [60] на дію постійного та снігового навантажень з таблиці 6.1. Застосована сталь С 245 з розрахунковим опором $R_y = 240$ МПа. Результати розрахунків наведені в таблиці 6.2. Враховуючи близькість оптимальної та мінімальної висоти балки, поперечні перерізи підбиралися з умови міцності за нормальними напруженнями і перевірялися за жорсткістю. З умови $f/l = 1/250$ для балки, запроєктованої на рекомендовані навантаження, визначено допустиме значення згинаючого моменту 317.4 КНм. Відкинувши момент від дії нормативного постійного навантаження, отри-

муємо допустиме значення граничного снігового навантаження $q = 1.60$ КПа. Згідно з формулою (2.3), воно відповідає періоду повторюваності 10.5 року. З формули (2.6) можна знайти частку строку служби $\mu = 0.00095$. Таким чином, прогин балки, запроєктованої за рекомендаціями розділів 2 і 3, може перевищувати допустиме значення $[f/l] = 1/250$ у середньому один раз на 10.5 року, або протягом 0.095% строку часу експлуатації. Виходячи з досвіду експлуатації промислових будівель, такі показники можна вважати цілком задовільними.

Колона каркаса розрахована за СНиП II-23-81* [60] на позacentровий стиск від дії навантажень, вказаних в таблиці 6.1. В результаті статичного розрахунку поперечної рами, розрахункова схема якої зображена на рисунку 6.2, отримані коефіцієнти впливу вітрового навантаження на згинаючий момент в нижньому перерізі лівої колони:

- від вітру зліва - 66.6 КНм/КПа;
- від вітру справа - 60.8 КНм/КПа.

При цьому враховані аеродинамічні коефіцієнти для активного та пасивного тиску вітру $C_a = 0.8$ та $C_n = 0.5$. Розрахункові зусилля в нижньому перерізі лівої колони від навантажень за СНиП [58] та за рекомендаціями розділів 2 і 3 наведені в таблиці 6.3. Сумарні зусилля від дії снігового та вітрового навантажень за СНиП [58] обчислені з урахуванням коефіцієнта сполучення $\psi = 0.9$.

За рекомендаціями розділу 4, коефіцієнт сполучення визначається залежно від часток змінних навантажень у складі сумарного зусилля (4.8). Виходячи з наведених в таблиці 6.3 зусиль та коефіцієнтів k_T , k_ϕ з таблиць 4.1, 4.2, визначаємо чисельники формули (4.8):

$$\text{для снігу} - 72 \cdot 33.3 + 4.3 \cdot 6 / 0.23 = 352$$

$$\text{для вітру} - 0 + 32 \cdot 6 / 0.23 = 835.$$

Частки снігового та вітрового навантажень за формулою (4.8)

$$\text{дорівнюють: } C_o = 352 / (352 + 835) = 0.297;$$

$$C_b = 835 / (352 + 835) = 0.703,$$

а коефіцієнт сполучення (4.4)

$$\psi = 0.297^{1.405} + 0.703^{1.442} = 0.783.$$

З його урахуванням за формулою (4.1) обчислені розрахункові значення стискувочої сили $N = 113.6$ кН та згинаючого момента $M = 31.8$ кНм, які й використані для розрахунку поперечного перерізу колони.

Таблиця 6.3

Розрахункові зусилля в колоні

Навантаження та розрахункові комбінації	За СНиП		Рекомендовані	
	М, кНм	N, кН	М, кНм	N, кН
1 Постійне	3.4	57.2	3.4	57.2
2 Снігове	2.1	35.3	4.3	72.0
3 Вітер зліва	-28.0	0	-35.0	0
4 Вітер справа	25.5	0	32.0	0
1 + 3	-24.6	57.2	-31.6	57.2
1 + 4	28.9	57.2	35.4	57.2
1 + 2 + 4	28.2	92.5	31.8	113.6

Таблиця 6.4

Результати розрахунку колони

Показники		За СНиП	Рекоменд.
Розрахункові зусилля:	N, кН	92.5	113.8
	M, кНм	28.2	31.8
Поперечний переріз колони		23Б1	23Б2
	A, см ²	30.1	32.5
	i_x , см	9.41	9.58
Гнучкість у площині рами		128	125
Відносний ексцентриситет	m	3.86	3.51
Розрахунковий ексцентриситет	m	4.98	4.88
Коефіцієнт стійкості	φ_e	0.151	0.157
Умовні напруження при перевірці стійкості $\sigma = N / (A \varphi_e)$, МПа		204	223

Поперечні перерізи колон обох варіантів визначені за вимогами та формулами СНиП II-23-81* [60] з умови стійкості у площині рами. Стійкість у напрямку, перпендикулярному площині дії момента, забезпечується зв'язями по колонах та стіновими панелями. За вказівкою СНиП [60], застосована сталь С 235 з $R_y = 230$ МПа. Основні результати розрахунків наведені в таблиці 6.4. Колони, виконані з прокатних двотаврів 23Б1 та 23Б2, мають достатню несучу здатність, а їх гнучкість практично відповідає вимогам СНиП [60].

Таблиця 6.5

Витрати сталі на основні несучі конструкції

Несучі конструкції	За СНиП	Рекоменд.	Різниця
Балка покриття (кг)	674	840	19.8%
Колона каркаса (кг)	187	202	7.4%
Усього поперечна рама	1048	1244	15.7%

Порівняння результатів проектних розрахунків основних несучих конструкцій каркаса складської будівлі, виконаних з урахуванням снігового та вітрового навантажень за чинними нормами [58] та за рекомендаціями розділів 2, 3 і 4 даної книги, виконане в таблиці 6.5. Витрати сталі обчислені з урахуванням отриманих поперечних перерізів елементів та відомих конструктивних коефіцієнтів. З таблиці видно, що для забезпечення достатнього рівня надійності при строковій службі будівлі $T = 60$ років балку покриття, яка сприймає снігове навантаження, потрібно суттєво підсилювати. Витрати сталі на колону збільшуються помірно, а в цілому по несучих конструкціях каркаса матеріаломісткість зростає на 15.7%.

Запропоноване збільшення матеріаломісткості та вартості конструкцій забезпечить їх безаварійну експлуатацію протягом встановленого строку служби. Оскільки збитки від аварії у десятки чи сотні разів перевищують вартість самої конструкції, такий підхід повинен дати значний економічний ефект для народного господарства України.

Розділ 7. ІМОВІРНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СНІГОВОГО ТА ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕНЬ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

У попередніх розділах викладені результати нормування снігового та вітрового навантажень, які дозволяють вести проектування будівельних конструкцій методом граничних станів. При розрахунках надійності навантаження подаються у формі випадкових процесів, випадкових величин, а також послідовностей максимальних значень. З метою інформаційного забезпечення розрахунків надійності будівельних конструкцій виконане територіальне районування України за основними статистичними характеристиками розглянутих навантажень, результати якого подаються нижче.

Усі зрайоновані статистичні характеристики визначені за тими ж метеорологічними даними, які використовувалися для нормування розрахункових значень снігового та вітрового навантажень. Карти територіального районування розроблені за методикою, викладеною в підрозділі 1.5. З метою максимального наближення районних характеристик до фактичних метеорологічних даних додаткові запаси в карти районування не вводилися, а кроки градації районних значень приймалися якомога меншими. Перелік розглянутих імовірнісних моделей та розроблених карт наведений в таблицях 7.1 і 7.3. В тих же таблицях охарактеризовані запаси карт районування: середнє значення, стандарт, верхня та нижня межа довірчого інтервалу для відхилень районних значень від даних окремих метеостанцій.

Районування статистичних характеристик виконане для двох імовірнісних моделей снігового навантаження: квазістаціонарного диференційовного процесу та послідовності річних максимумів ваги снігового покриву. З таблиці 7.1 видно, що карти математичного сподівання випадкового процесу M_n та послідовності річних максимумів M_m снігового навантаження складені в запас надійності. Про це свідчать як середні

значення запасів районування, так і їх довірчі інтервали, які значною мірою зміщені в область додатніх відхилень. В усіх інших випадках (карти коефіцієнтів варіації V_n і V_m , коефіцієнта асиметрії A_n та ефективної частоти ω) запаси територіального районування зведені до мінімуму.

Таблиця 7.1

Загальна характеристика карт територіального районування статистичних характеристик снігового навантаження

Імовірнісні моделі	Характеристики	Номери карт	Запаси карт районування (%)			
			середнє	стандарт	мінімум	максимум
Квазістаціонарний випадковий процес	M_n	7.1	25.4	39.8	-20.8	93.7
	V_n	7.2	2.4	8.6	-14.7	18.0
	A_n	7.3	6.4	13.7	-17.7	28.2
	ω	7.4	6.1	14.8	-21.0	36.4
Послідовн. річних максимумів	M_m	7.5	14.5	18.6	-9.1	49.1
	V_m	7.6	3.2	13.5	-13.9	24.5

Згідно з методикою [31] імовірнісного подання снігового навантаження у формі квазістаціонарного диференційовного випадкового процесу, його коефіцієнт варіації V_n , коефіцієнт асиметрії A_n та ефективна частота ω не змінюються у часі. Ці характеристики безпосередньо визначаються за картами, вказаними в таблиці 7.1.

Математичне сподівання квазістаціонарного випадкового процесу снігового навантаження є функцією часу $M(t)$, яку в [31] рекомендовано апроксимувати алгебраїчним поліномом 3-го ступеня. Для територіального районування використані функції математичного сподівання, обчислені за даними 64 українських метеостанцій. Визначені максимальні значення цих функцій: $M_n = \max\{M(t)\}$ і складена карта їх територіального районування, наведена на рисунку 7.1. Кожна з 64 наявних функцій математичного сподівання пронормована шляхом ділення на її



Рис. 7.3 Математичні сподівання процесу снігового навантаження

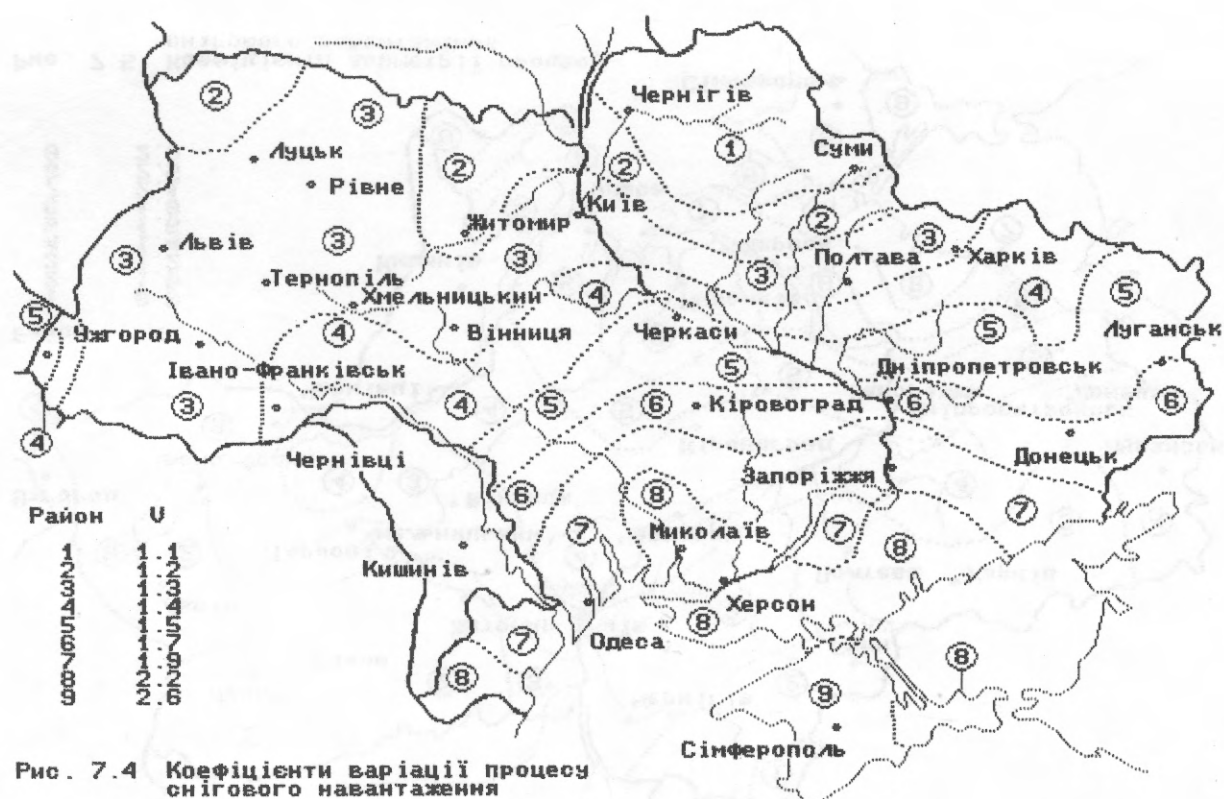
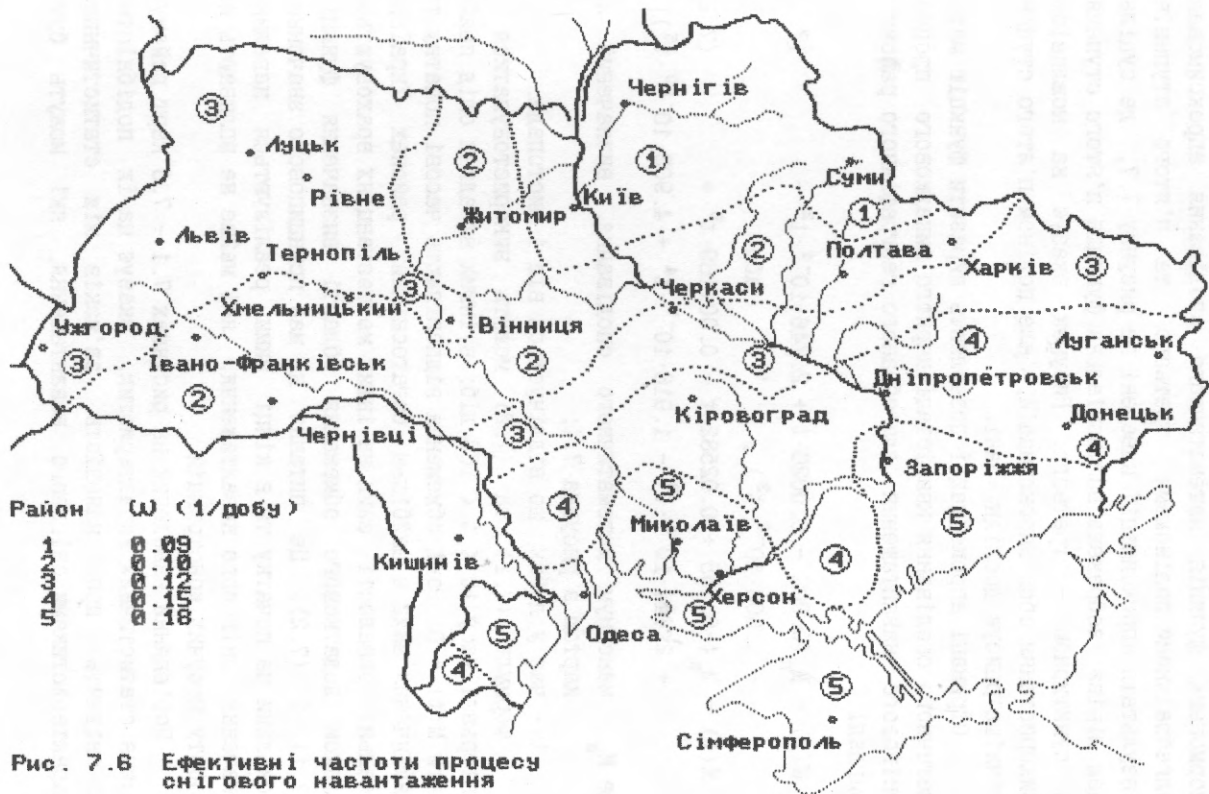
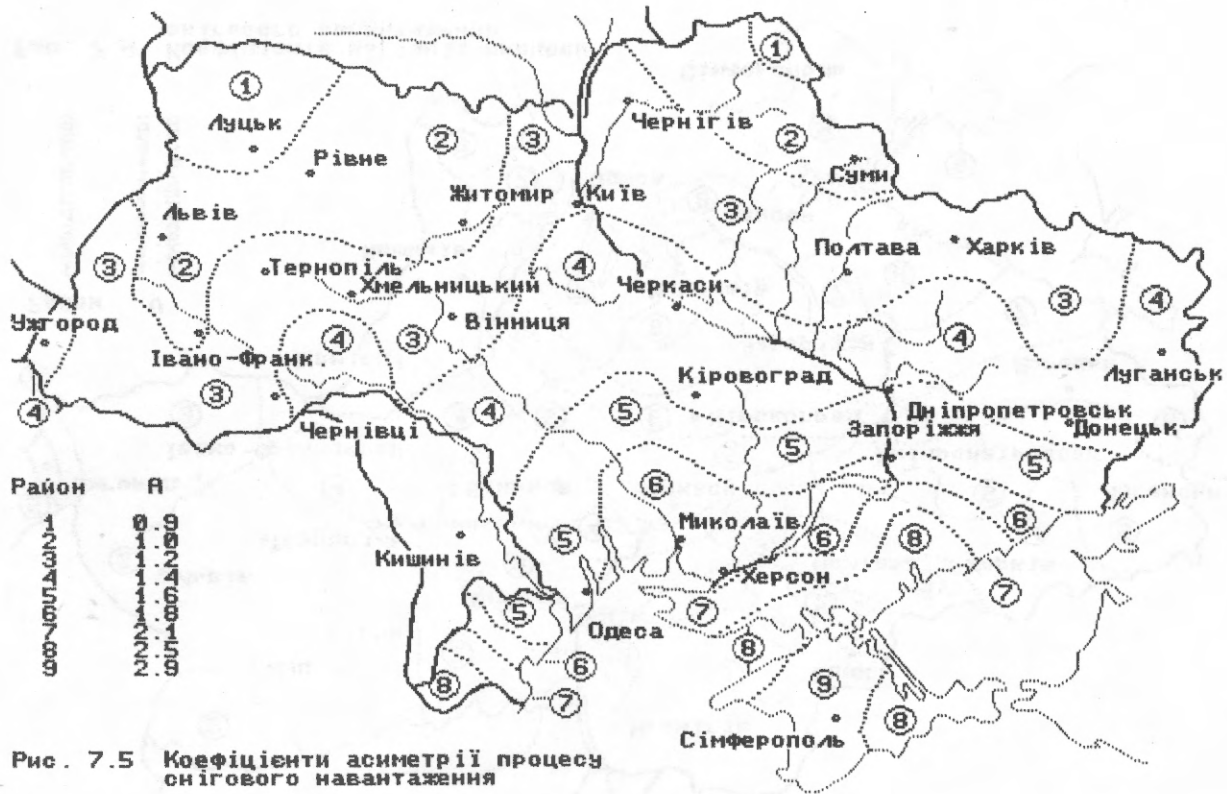


Рис. 7.4 Коефіцієнти варіації процесу снігового навантаження



максимальне значення: $M(t)/M_{\Pi}$. Осереднена в межах України нормована функція математичного сподівання апроксимована алгебраїчними поліномами третього та п'ятого ступенів. Результати апроксимації наведені на рисунку 7.7, де суцільною лінією зображена поліноміальна функція п'ятого ступеня, а пунктирною - третього. Рисунок вказує на можливість використання обох апроксимацій, але поліном п'ятого ступеня точніше описує дослідні дані.

Отримані апроксимації дозволяють виразити функцію математичного сподівання квазістационарного випадкового процесу снігового навантаження для обраного географічного району у вигляді

$$M(t) = M_{\Pi} (0.002 - 0.0026 \cdot t + 2.746 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 1.606 \cdot 10^{-6} \cdot t^3), \quad \text{або} \quad (7.1)$$

$$M(t) = M_{\Pi} (-0.155 + 0.02582 \cdot t - 0.001169 \cdot t^2 + 2.444 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 1.916 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 + 4.903 \cdot 10^{-10} \cdot t^5), \quad (7.2)$$

де M_{Π} - максимум математичного сподівання, визначений за картою з рисунка 7.1;

t - час у добах, що відлічується від 1 листопада.

Формули (7.1) та (7.2) можуть використовуватися в інтервалі часу $10 < t < 160$ діб; в інших випадках слід приймати $M(t) = 0$. Такі обмеження відповідають часові початку та закінчення зими в найбільш багатосніжних районах України. Реальні тривалості зими на інших метеостанціях враховуються шляхом додаткового обмеження області визначення функцій (7.1) і (7.2). Це питання не має принципового значення, оскільки на початку та в кінці зими реалізуються невеликі значення снігового навантаження, які майже не впливають на роботу несучих конструкцій.

Порівняння наведених на рисунках 7.1 - 7.6 карт районування статистичних характеристик, вказує на їх подібність. Це свідчить про наявність зв'язків між статистичними характеристиками снігового навантаження, які можуть бути

використані при дослідженнях надійності конструкцій. Аналіз матриці кореляцій між статистичними характеристиками для згаданих вище 64 метеостанцій дозволив виявити такі залежності. Перелік найтісніших залежностей, які можна використовувати для визначення одних характеристик через інші, наведений в таблиці 7.2. Значення математичних сподівань M_M і M_{Π} наведені в паскалях, а ефективної частоти ω - в 1/добу; інші величини є безрозмірними.

Усі виявлені залежності апроксимовані показниковою функцією

$$Y = A X^B, \quad (7.3)$$

параметри якої A, B наведені в таблиці 7.2. Там же вказані коефіцієнти лінійної кореляції між досліджуваними характеристиками R_{xy} , а також розмахи фактичних даних, в межах яких виконувалася апроксимація.

Таблиця 7.2

Взаємозв'язок статистичних характеристик снігового навантаження

Аргумент		Функція		R_{xy}	Параметри (7.3)	
X	розмах	Y	розмах		A	B
M_M	105 - 865	M_{Π}	37 - 626	0.965	0.032	1.444
M_M	105 - 865	V_{Π}	0.89 - 2.89	-0.826	43.98	-0.564
M_{Π}	37 - 626	V_{Π}	0.89 - 2.89	-0.776	10.83	-0.380
M_{Π}	37 - 626	A_{Π}	0.77 - 3.14	-0.617	10.87	-0.406
M_{Π}	37 - 626	ω	0.06 - 0.25	-0.709	0.767	-0.356
V_{Π}	0.89 - 2.89	A_{Π}	0.77 - 3.14	0.943	0.818	1.171
V_{Π}	0.89 - 2.89	ω	0.06 - 0.25	0.721	0.086	0.815

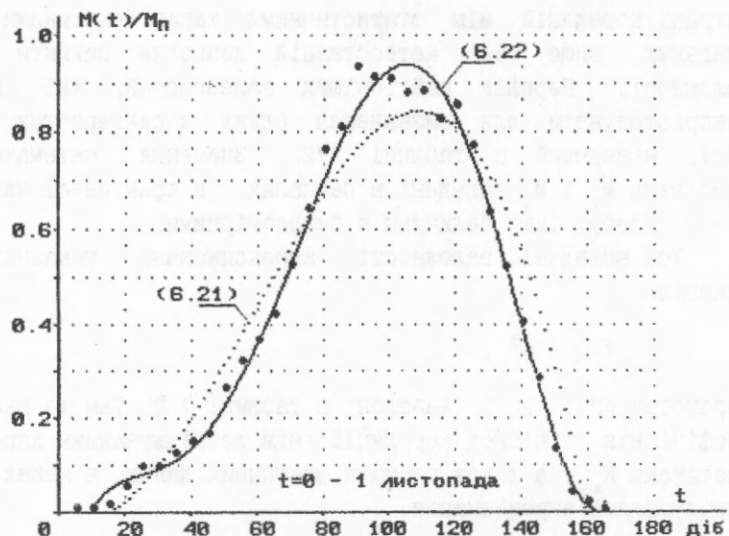


Рис. 7.7 Нормована функція математичного сподівання випадкового процесу снігового навантаження

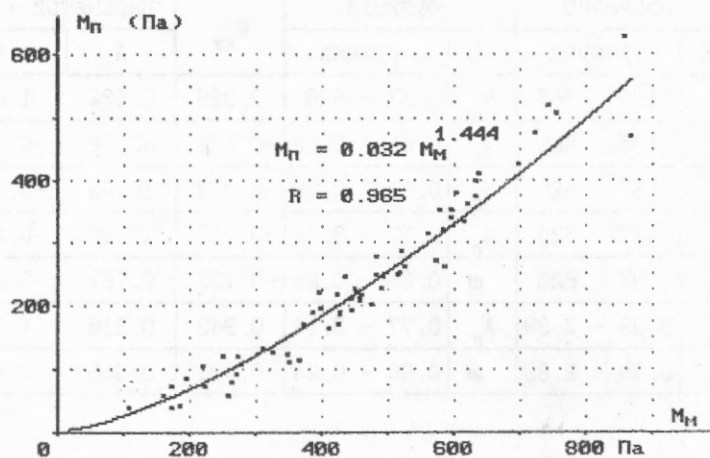


Рис. 7.8 Зв'язок між математичними сподіваннями річного максимуму та випадкового процесу ваги снігу

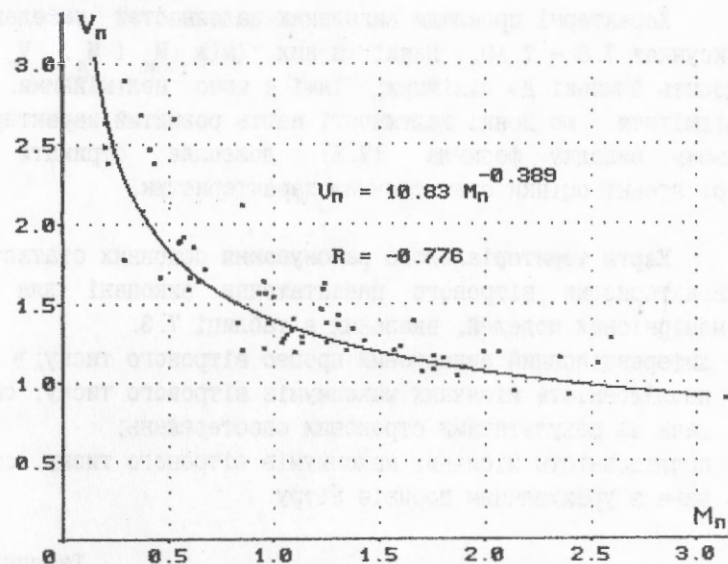


Рис. 7.9 Залежність коефіцієнта варіації процесу снігового навантаження від математичного сподівання

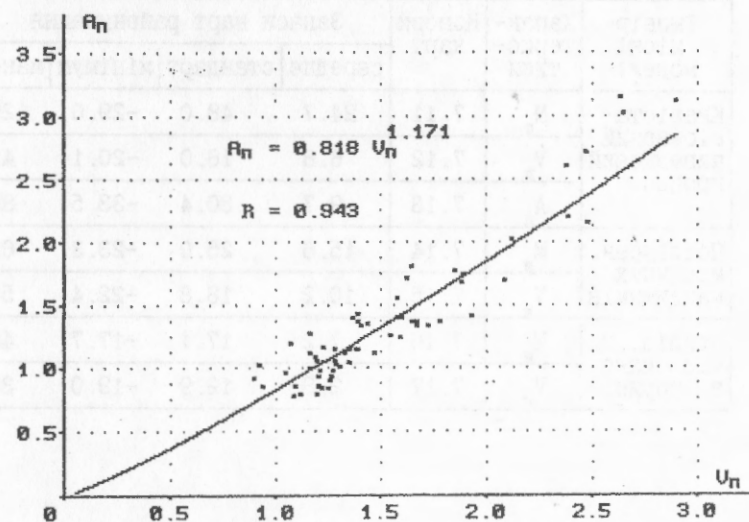


Рис. 7.10 Залежність коефіцієнта асиметрії процесу снігового навантаження від його коефіцієнта варіації

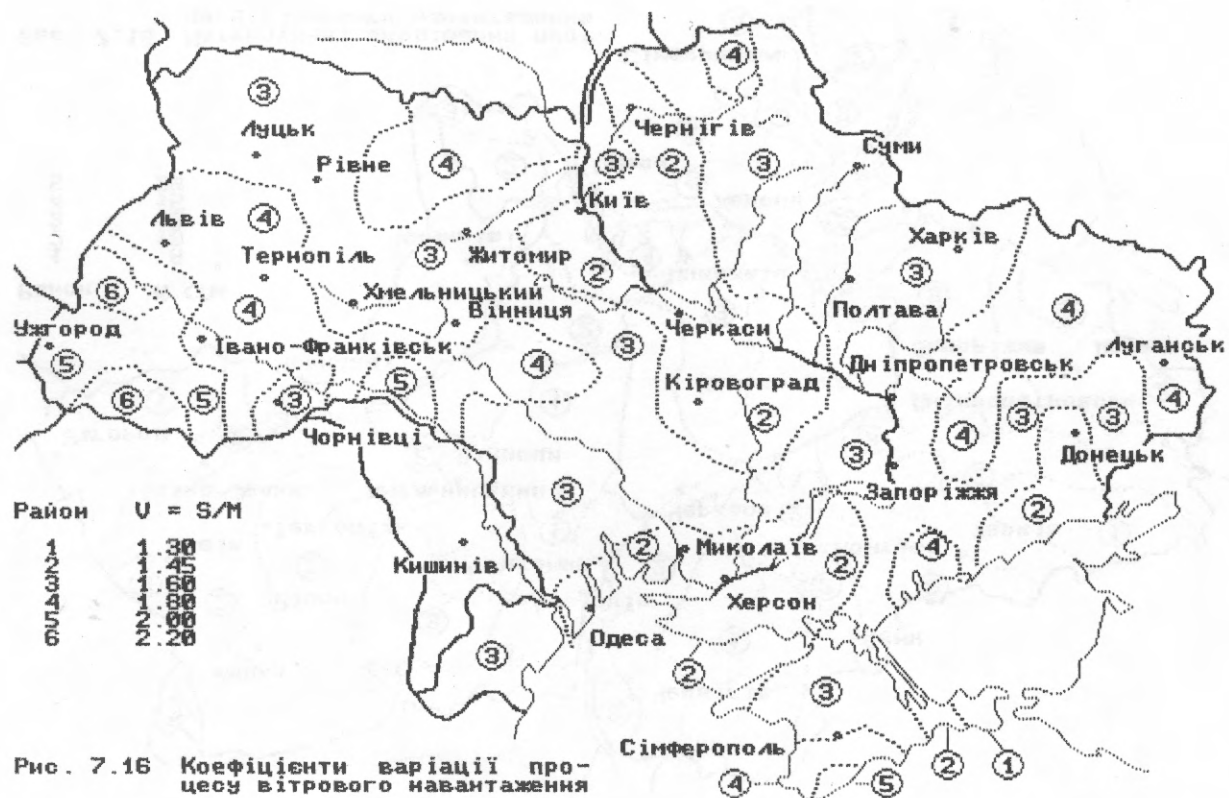


Рис. 7.12 Коефіцієнти варіації місячних максимумів вітрового навантаження (в поріві)



Рис. 7.13 Математичні сподівання місячних максимумів вітрового навантаження (середня складова)





Наведені в таблиці 7.3 результати порівняння районних значень з фактичними показують, що розроблені карти територіального районування статистичних характеристик мають порівняно невеликі запаси. Середні відхилення районних значень характеристик від фактичних не перевищують 10%, і лише математичні сподівання двох імовірнісних моделей районувані з дещо більшими запасами. Окрім середніх значень, в таблиці 7.3 наведені стандарти цих розподілів, а також межі 90% довірчих інтервалів для запасів розроблених карт.

Розроблені карти дозволяють визначати статистичні характеристики імовірнісних моделей вітрового навантаження, перерахованих в таблиці 7.3, для довільного географічного району України. Математичні сподівання M_w та коефіцієнти варіації V_w послідовностей місячних максимумів вітрового тиску, сформованих за результатів строкових спостережень чи з урахуванням поривів вітру, безпосередньо визначаються за картами 7.14 - 7.17. Математичні сподівання та коефіцієнти варіації послідовностей річних максимумів вітрового тиску можна обчислити за відомими формулами [11] через відповідні характеристики місячних максимумів.

Математичне сподівання M_w , коефіцієнти варіації V_w та асиметрії A_w стаціонарного диференційовного випадкового процесу вітрового тиску для заданого географічного району України визначаються безпосередньо з карт 7.11, 7.12 та 7.13. Ефективну частоту диференційовного випадкового процесу вітрового навантаження для усієї території України можна вважати рівною $\omega = 5.5$ 1/добу, а нормовану кореляційну функцію описати експонентою з параметром $\alpha = 1.8$ 1/добу.

Для подання вітрового тиску в формі квазістаціонарного диференційовного випадкового процесу [31] встановлені залежності його статистичних характеристик від характеристик стаціонарного процесу, для яких вище виконане територіальне районування України. Коефіцієнти варіації V_w та асиметрії A_w квазістаціонарного випадкового процесу вітрового навантаження визначаються за формулами:

$$V_w = 0.888 \cdot V_w + 0.23; \quad (7.4)$$

$$A_w = 0.823 \cdot A_w + 0.34, \quad (7.5)$$

де V_w і A_w - коефіцієнти варіації і асиметрії стаціонарного процесу, визначені за картами 7.12 та 7.13.

Як приклад, на рисунку 7.18 зображена залежність між коефіцієнтами варіації V_w та V_w . Залежність коефіцієнта асиметрії A_w від A_w також має лінійний характер при коефіцієнті кореляції 0.966. Досить тісний зв'язок між вказаними величинами дозволяє впевнено користуватися формулами (7.4) і (7.5) для визначення статистичних характеристик квазістаціонарного випадкового процесу вітрового навантаження.

Функцію математичного сподівання квазістаціонарного випадкового процесу вітрового навантаження рекомендується визначати за однією з формул:

$$M_w(t) = M_w [B_0 + B_1 \cdot t + B_2 \cdot t^2 + B_3 \cdot t^3]; \quad (7.6)$$

$$M_w(t) = M_w [B_0 + B_1 \cdot t + B_2 \cdot t^2 + B_3 \cdot t^3 + B_4 \cdot t^4]; \quad (7.7)$$

$$M_w(t) = M_w [B_0 + B_1 \cdot \cos(0.01745 \cdot t) + B_2 \cdot \sin(0.01745 \cdot t)], \quad (7.8)$$

де M_w - математичне сподівання стаціонарного процесу за картою з рисунка 7.11;

t - час, який відлічується в добах від 1 січня;

$B_0 \dots B_4$ - параметри, наведені в таблиці 7.4.

Таблиця 7.4
Апроксимація функції математичного сподівання

Параметри	Значення параметрів для функцій		
	(7.6)	(7.7)	(7.8)
$B_0 =$	1.393	1.128	1.0057
$B_1 =$	-1.991E-03	1.188E-02	0.2864
$B_2 =$	-2.133E-05	-1.917E-04	0.1441
$B_3 =$	7.662E-08	8.093E-07	
$B_4 =$		-1.018E-09	

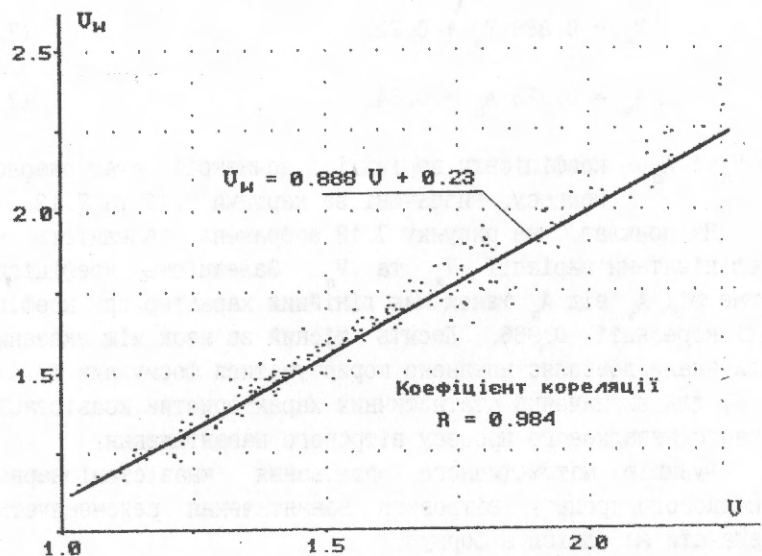


Рис. 7.18 Залежність між коефіцієнтами варіації процесу вітрового навантаження U_M та U

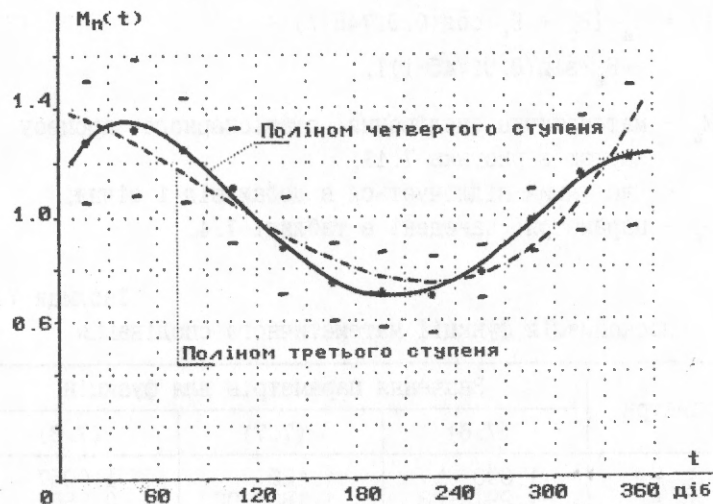


Рис. 7.19 Нормована функція математичного сподівання квазістаціонарного процесу вітр. навантаження

Наведені в таблиці 7.4 параметри формул (7.6), (7.7), (7.8) отримані у результаті апроксимації функцій математичного сподівання квазістаціонарного випадкового процесу вітрового тиску, пронормованих шляхом ділення на відповідні значення M_n і осереднених по усіх метеостанціях. Нормована функція математичного сподівання разом з апроксимуючими її алгебраїчними поліномами третього (7.6) та четвертого (7.7) ступеня зображена на рисунку 7.19. Імовірні похибки від заміни дослідних функцій математичного сподівання осередненою залежністю зображені у формі 90% довірчих меж.

Районні значення статистичних характеристик снігового та вітрового навантажень отримані для найбільш поширених імовірнісних моделей. Параметри інших імовірнісних моделей навантажень можна обчислити через відомі характеристики розглянутих моделей за методами, розробленими в [42-44]. Це дозволяє використовувати результати виконаного районування при різних підходах до розрахунку надійності несучих будівельних конструкцій.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ананьин Ю. А., Пичугин С. Ф., Пашинский В. А. К вопросу определения расчетной температуры стальных несущих конструкций цехов черной металлургии // Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания "Повышение эффективности эксплуатации и реконструкции промзданий металлургической, машиностроительной и горнорудной промышленности". - Макеевка: 1981. - с. 5-7.
2. Анапольская Л. Е. Режим скоростей ветра на территории СССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1961. - 200 с.
3. Барашиков А. Я. Расчет железобетонных конструкций на действие длительных переменных нагрузок. Издание второе. - К.: Будівельник, 1977. - 156 с.
4. Бельшев И. А., Клепиков Л. В. Статистический анализ данных о температуре воздуха для расчета конструкций // Исследование нагрузок на сооружения и надежность строительных конструкций: Труды ЦНИИСК. - вып. 42. - М.: Стройиздат. - 1976. - с. 7-23.
5. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. - М.: Стройиздат, 1982. - 385 с.
6. Болотин В. В., Отставнов В. А. О принципах назначения расчетных нагрузок на сооружения // Строительная механика и расчет сооружений. - 1979. - № 5. - с. 3-5.
7. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. - М.: ВЦ АН СССР, 1968. - 476 с.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. - М.: Физматгиз, 1962. - 564 с.
9. Городецкий Б. Л., Котлов Г. Г., Соколкин А. Ф. Статические исследования постоянных нагрузок от собственной массы покрытий в промышленных зданиях // Проблемы надежности в строительном проектировании. - Свердловск. - 1972. - с. 40-45.

10. ГОСТ 27751-88 (СТ СЭВ 384-87). Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. - М.: 1988. - 10 с.
11. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. - М.: Мир, 1965. - 450 с.
12. ДБН 362-93. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації/Держбуд України. - К.: Укрархбудінформ, 1995. - 46 с.
13. ДБН В.1.2-...-97. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності і безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. (Проект). - К.: УкрНДІПСК, 1997. - 57 с.
14. Журански Е. А., Соболевски А. Некоторые проблемы снеговых нагрузок на крыши // Симпозиум "Строительная климатология", сентябрь 20-24: Труды, часть IIIб. - М.: 1983. - с. 281-295.
15. Заварина М. В. Строительная климатология. - Л.: Гидрометеиздат, 1976. - 312 с.
16. Кінаш Р. І., Бурнаєв О. М. Вітрове навантаження і вітроенергетичні ресурси в Україні. - Львів: Видавництво науково-технічної літератури, 1998. - 1152 с.
17. Кінаш Р. І., Бурнаєв О. М. Снігове навантаження в Україні. - Львів: Видавництво науково-технічної літератури, 1997. - 848 с.
18. Кінаш Р. І., Бурнаєв О. М., Федик І. З. Оцінка придатності рекомендацій чинних будівельних норм до встановлення нормативів за сніговим навантаженням // Тезиси докладів УІ Української науково-технічної конференції "Металлические конструкции". - Киев-Николаев, 1996. - с. 55-56.
19. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Пер. с англ. - М.: Наука, 1970. - 720 с.

20. Кошутин Б.Н. Кунин Ю.С., Пашинский В.А. Обобщенная математическая модель вертикальной крановой нагрузки // Вопросы надежности железобетонных конструкций. - Куйбышев. - 1985. - с. 40-51.
21. Крамер Г. Математические методы статистики. - М.: Мир, 1975. - 648 с.
22. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования. - М.: Статистика, 1979. - 254 с.
23. Метеорологический ежегодник. Наблюдения гидрометеорологических станций и постов над снежным покровом (снегосъемки). - Вып. 10. - Л.: Гидрометеоиздат. - 1951-1978.
24. Метеорологический ежемесячник. Часть II, Выпуск 10. - Л.: Гидрометеоиздат. - 1961-1991.
25. Методика учета величины грузовой площади при определении постоянной нагрузки на конструкции покрытий промзданий / Пашинский В.А.: Полтавский ИСИ. - Полтава, 1988. - 12 с. - Деп. во ВНИИИС 29.07.88, N 9362.
26. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3, часть 1. Метеорологические наблюдения на станциях. - Л.: Гидрометеоиздат, 1963. - 308 с.
27. Пашинский В.А. Вероятностное описание атмосферных нагрузок // Проблемы оптимизации и надежности в строительной механике: Тезисы докладов Всесоюзной конференции. - М.: 1983. - с. 62-63.
28. Пашинский В.А. К учету срока службы при проектировании элементов несущих конструкций // Надежность строительных конструкций: Межвузовский сборник научных трудов. - Куйбышев: 1990. - с. 95-96.
29. Пашинский В.А. Методика нормирования атмосферных нагрузок на территории Украины // Пятая Украинская научно-техническая конференция по металлическим конструкциям. Усиление и реконструкция производственных зданий, построенных в металле: Тезисы докладов. - К.: 1992. - с. 9-10.

30. Пашинский В.А. Методика определения коэффициентов сочетания усилий от снеговых, ветровых и крановых нагрузок // Строительная механика и расчет сооружений. - 1988. - N 2. - с. 73-76.
31. Пашинский В.А. Представление атмосферных нагрузок в виде дифференцируемых случайных процессов. // Строительная механика и расчет сооружений. - 1992. - N 1. - с. 92-96.
32. Пашинский В.А. Сочетания усилий от атмосферных и крановых нагрузок, действующих на стальные каркасы одноэтажных производственных зданий: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / МИСИ. - М., 1986 - 23 с.
33. Пашинский В.А., Пичугин С.Ф. К статистическому анализу нагрузок // Проблемы оптимизации и надежности в строительной механике: Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Вильнюс, 1979. - М.: Стройиздат. - 1979. - с. 127-128.
34. Пашинский В.А., Семенова Т.Ю., Игольницкая И.А. Определение ветровой нагрузки на производственные здания с учетом их ориентации и срока службы // Прочность, надежность и долговечность строительных конструкций: Межвузовский сборник. - Магнитогорск: 1990. - с. 114-122.
35. Пашинский В.А., Фенко А.Г. Вычисление и анализ коэффициентов сочетания усилий от постоянных нагрузок на строительные конструкции // Эффективные строительные материалы и конструкции, используемые при возведении зданий и сооружений. - К.: УМК ВО. - 1992. - с. 36-43.
36. Пашинский В.А., Фенко А.Г. Вычисление коэффициентов сочетания нагрузок, представленных в виде последовательностей максимальных значений // Пятая Украинская научно-техническая конференция по металлическим конструкциям. Усиление и реконструкция производственных зданий, построенных в металле: Тезисы докладов. - Киев: 1992. - с. 37-38.

37. Пашинський В. А. До методики територіального районування атмосферних навантажень з урахуванням строку служби конструкцій // Технічна метеорологія Карпат: Матеріали першої Міжнародної науково-технічної конференції - ТМК-98. - Львів: Оксарт. - 1998. - с. 91-96.
38. Пашинський В. А. Забезпеченість розрахункових значень атмосферних навантажень на будівельні конструкції // Проблеми теорії і практики залізобетону: Збірник наукових статей. - Полтава: 1997. - с. 380-383.
39. Пашинський В. А. Методика територіального районування розрахункових параметрів атмосферних навантажень на будівельні конструкції // Коммунальное хозяйство городов: Республиканский межведомственный научно-технический сборник. - Вып. 12. - К.: Техника. - 1997. - с. 50-55.
40. Пашинський В. А. Проблема точності оцінювання розрахункових навантажень на будівельні конструкції // Полтавський державний технічний університет імені Юрія Кондратика: Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). - Вып. 1. - Полтава: ПДТУ. - 1998. - с. 73-78.
41. Пашинський В. А., Кайдановський Е. В., Кальченко А. О. Снігове навантаження на покрівлю // АПК. Наука, техніка, практика. - 1990. - N 12. - с. 43.
42. Пашинський В. А., Фенко О. Г. Визначення періодичності послідовностей максимумів тимчасових навантажень при врахуванні їх спільної дії // Коммунальное хозяйство городов: Республиканский межведомственный научно-технический сборник. - Вып. 12. - К.: Техника. - 1997. - с. 58-60.
43. Перельмутер А. В. Работоспособность конструкций, запроектированных по ранее действовавшим нормам снеговых нагрузок // Строительная механика и расчет сооружений. - 1986. - N 3. - с. 19-21.
44. Перельмутер А. В. Управление поведением несущих конструкций. - К.: УФИМБ, 1998. - 148 с.

45. Перельмутер А. В., Пашинський В. А. Про класифікацію навантажень та дій на будівельні конструкції // Технічна метеорологія Карпат: Матеріали першої Міжнародної науково-технічної конференції - ТМК-98. - Львів: Оксарт. - 1998. - с. 75-78.
46. Пичугин С. Ф. Вероятностное описание снеговых нагрузок для территории Украины // Технічна метеорологія Карпат: Матеріали першої Міжнародної науково-технічної конференції - ТМК-98. - Львів: Оксарт. - 1998. - с. 85-90.
47. Пичугин С. Ф. Вероятностное представление нагрузок, действующих на строительные конструкции // Известия высших учебных заведений. Строительство. - 1995. - N 4. - с. 12-18.
48. Пичугин С. Ф. Вероятностный анализ ветровой нагрузки // Известия высших учебных заведений. Строительство. - 1997. - N 12. - с. 13-20.
49. Пичугин С. Ф. Вероятностный расчет стальных элементов на совместное действие нагрузок // Известия высших учебных заведений. Строительство. - 1996. - N 5-6. - с. 23-29.
50. Пичугин С. Ф., Пашинський В. А. Учет совместного действия экстремумов случайных нагрузок // Испытания строительных металлических конструкций в условиях действующих предприятий. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. - Магнитогорск. - 1991. - с. 29-31.
51. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций. (К СНиП 11-23-81). - М.: Стройиздат, 1989. - 159 с.
52. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Наука, 1979. - 496 с.
53. Райзер В. Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. - М.: Стройиздат, 1995. - 348 с.
54. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. - М.: Стройиздат, 1978. - 239 с.

55. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. - М.: Наука, 1968. - 464 с.
56. Сидоренко М.В. Досвід оцінки надійності Чорнобильського укриття // Будівництво України. - 1995. - № 5. - с. 20-22.
57. Симиу С., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения: Пер. с англ. - М.: Стройиздат, 1984. - 360 с.
58. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. - 36 с.
59. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. - 80 с.
60. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. - 96 с.
61. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. - М.: Наука, 1973. - 312 с.
62. Справочник по климату СССР. Часть II. Температура воздуха и почвы. Выпуск 10. - Л.: Гидрометеиздат, 1967. - 608 с.
63. Справочник по климату СССР. Часть III. Ветер. Вып. 10. - Л.: Гидрометеиздат, 1967. - 698 с.
64. Справочник по климату СССР. Часть IV. Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров. Выпуск 10. - Л.: Гидрометеиздат, 1969. - 696 с.
65. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / Под ред. В.С. Королюка. - К.: Наукова думка, 1978. - 582 с.
66. Улицкий И.И. Теория и расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом длительных процессов. - К.: Будівельник, 1967. - 348 с.

67. Фенко О.Г. Сполучення зусиль при розрахунках будівельних конструкцій виробничих будівель: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / ПДТУ. - Полтава, 1998. - 17 с.
68. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. - М.: Советское радио, 1962. - 552 с.
69. AIJ Recommendations for Loads on Building / Architectural Institute of Japan. - Tokyo: Shiba, 1996. - 132 p.
70. ENV 1991-1. Eurocode 1: Basic of Desing and Actions of Structures. Part 1: Basic of Desing. - CEN, 1994.
71. ENV 1991-2-4. Eurocode 1: Basic of Desing and Actions of Structures. Part 2-4: Wind Actions. - Brussels, Belgium, CEN, European Committee for Standardization, 1994.
72. ISO ST 2394. General Principles on Reliability for Structures. - 1994. - 50 p.
73. Pashinski V.A. and Pichugin S.F. Wind Load Probabilistic Description and Value Computation Procedure Adopted for Building Code of Ukraine // East European Conference on Wind Engineering "EECWE'94". - Warsaw, Poland: 1994. - Part 1. - Vol. 3. - p. 49-51.
74. Wieringa J. Representativity Problems of Wind Stations // E.U.-COST Seminar on Data Spatial Distribution in Meteorology and Climatology. - Volterra, Italy. - 1997.
75. Zuranski J.A. Obczianzenia wiatrem budowli i konstrukcji: Wyd. 2. - Warszawa: Arkady, 1978. - 198 s.

З М І С Т

В С Т У П	3
Розділ 1. МЕТОДИ НОРМУВАННЯ ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ	6
1.1. Метод граничних станів, як засіб регулювання надійності елементів будівельних конструкцій	
1.2. Класифікація та загальні принципи нормування навантажень на будівельні конструкції	13
1.3. Імовірнісні моделі атмосферних навантажень	24
1.4. Методи обчислення граничних та експлуатаційних розрахункових значень змінних навантажень	34
1.5. Методика територіального районування розрахункових значень атмосферних навантажень	40
Розділ 2. НОРМУВАННЯ СНІГОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ	50
2.1. Метеорологічні дані, передумови та імовірнісні моделі, використані при нормуванні снігового навантаження	50
2.2. Граничні розрахункові значення снігового навантаження	56
2.3. Експлуатаційні розрахункові значення снігового навантаження	61
2.4. Квазіпостійні розрахункові значення снігового навантаження	66
2.5. Міжрічна мінливість снігового навантаження	73
Розділ 3. НОРМУВАННЯ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ	78
3.1. Метеорологічні дані, передумови та імовірнісні моделі, використані при нормуванні вітрового навантаження	78
3.2. Граничні розрахункові значення вітрового навантаження	83
3.3. Експлуатаційні розрахункові значення вітрового навантаження	89
3.4. Урахування напрямку вітру при нормуванні вітрового навантаження	93

Розділ 4. ІМОВІРНІСНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ НОРМУВАННЯ ІНШИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВПЛИВІВ	101
4.1. Нормування атмосферних навантажень на об'єкт, що експлуатується в Чорнобилі	101
4.2. Імовірнісна модель та методика нормування впливу температури повітря на будівельні конструкції	105
4.3. Методика нормування технологічних температур	115
4.4. Особливості нормування вертикальних навантажень від мостових кранів	124
4.5. Особливості нормування постійних навантажень від маси будівельних конструкцій	129
Розділ 5. УРАХУВАННЯ СУМІСНОЇ ДІЇ ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ	139
Розділ 6. ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ	146
Розділ 7. ІМОВІРНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СНІГОВОГО ТА ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕНЬ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ	152
Л І Т Е Р А Т У Р А	176

Комп'ютерний набір О. Г. Фенко
Технічний редактор Т. Ф. Демченко

Здано до набору 15.02.99.
Підписано до друку 10.03.99.
Формат видання 60x84/16. Папір офсетний.
Обл.-вид.арк. 11,5. Ум. др. арк. 12,75.
Зам. № 454. Тираж 500 прим.

Видавництво інститут УкрНДІПСК