



Doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-1>

УДК 624.011:536.2



**ФАРЕНЮК Г.Г.**

Доктор техн. наук, професор,  
директор, ДП «Державний  
науково-дослідний інститут  
будівельних конструкцій»,  
м. Київ, Україна,  
e-mail: [ndibk@ndibk.gov.ua](mailto:ndibk@ndibk.gov.ua),  
тел.: +38 (044) 249-38-00,  
ORCID: 0000-0002-5703-3976

## МЕТОДОЛОГІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС З ДОСЛІДЖЕНЬ В ГАЛУЗІ БУДІВЕЛЬНОЇ ФІЗИКИ

### АНОТАЦІЯ

Протягом більш ніж 40 років у Державному науково-дослідному інституті будівельних конструкцій (далі – ДП НДІБК) проводяться системні дослідження в галузі будівельної фізики. Будівельна фізика є сукупністю наукових дисциплін прикладної фізики, які розглядають фізичні явища і процеси, пов'язані з будівельною теплофізикою, будівельною і архітектурною акустикою, світлотехнікою.

Українська будівельна наука за цим напрямком має значні досягнення в розвитку теорії переносу теплоти та маси в огорожувальних конструкціях, забезпеченню акустичного комфорту в будівлях, спорудах та на прилеглих територіях, розробки та удосконаленню правил проектування будівель та споруд за вимогами енергоефективності. Грунтовність наукових результатів та їх практичне значення обумовлено застосуванням існуючого в ДП НДІБК експериментального комплексу з досліджень в галузі будівельної фізики, що складається з системи експериментального обладнання для проведення наукових досліджень будівельної продукції за теплофізичними, акустичними і світлотехнічними властивостями.

Випробувальний теплофізичний комплекс ДП НДІБК – це особливий науково-дослідний комплекс, основними елементами якого є унікальні кліматичні камери для випробувань теплоізоляційних властивостей огорожуваль-

них конструкцій та випробувальне обладнання для визначення теплотехнічних показників та теплофізичних властивостей будівельних конструкцій, матеріалів та виробів. Акустичний випробувальний комплекс ДП НДІБК – це науково-дослідний комплекс, основою якого є унікальні акустичні звукомірні камери та інше випробувальне обладнання, дослідження на яких дозволяють вирішувати комплексні задачі акустичного благоустрою та захисту від шуму приміщень в будівлях різного призначення, територій житлової забудови, ландшафтно-рекреаційних територій при їх проектуванні, новому будівництві та реконструкції.

У статті наведені методологічні основи проведення досліджень та надається опис експериментального комплексу лабораторних установок та обладнання.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** будівлі, будівельна теплофізика, показники енергоефективності, акустика, звукоізоляція, кліматичні камери, акустичні камери.

### METHODOLOGY AND EXPERIMENTAL COMPLEX FOR RESEARCH IN THE FIELD OF CONSTRUCTION PHYSICS

### ABSTRACT

For more than 40 years, the State Research Institute of Building Constructions (NIISK) has



been conducting systematic research in the field of construction physics. Construction physics is a set of scientific disciplines of applied physics that consider physical phenomena and processes related to construction thermophysics, construction and architectural acoustics, and lighting engineering.

In this area, Ukrainian construction science has significant achievements in developing the theory of heat and mass transfer in enclosing structures, providing acoustic comfort in buildings, structures, and adjacent areas, and developing and improving the design rules for buildings and structures according to energy efficiency requirements. The thoroughness of scientific results and their practical significance is due to the use of the NIISK experimental complex for research in the field of construction that comprises a system of experimental equipment for conducting scientific research of construction products on thermophysical, acoustic, and lighting properties.

The test thermophysical complex of the NIISK is a special research complex, whose main elements are unique climate chambers for testing the thermal insulation properties of enclosing structures and test equipment for determining the thermal engineering indicators and thermophysical properties of building structures of materials and products. The main elements of the acoustic testing complex of the NIISK is a special research complex that employs unique acoustic chambers and other testing equipment, which allows solving complex problems of acoustic improvement and noise protection of premises in buildings of various purposes, residential areas, and landscape and recreational areas during their design, construction, and reconstruction.

The article presents the methodological basis for conducting research and provides a description of the experimental complex of laboratory units and equipment.

**KEYWORDS:** buildings, construction thermophysics, energy performance indicators, acoustics, acoustic insulation, climate chambers, acoustic chambers.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Основним призначенням будівель є створення умов для життєдіяльності людини, які характеризуються тепловими, звуковими, світловими, бактеріологічними та газовими параметрами. Рівень комфортності перебування людини у приміщеннях будівлі є основним критерієм експлуатаційної придатності будівлі, що потребує відповідних енергетичних витрат на його забезпечення. Теплові параметри повітря та приміщень, рівень акустичного комфорту та світлового режиму вивчаються експериментально із застосуванням комплексу випробувального обладнання.

У 21-му столітті кардинально змінюється конструктивно-технологічний парк, що застосовується при новому будівництві та при

реконструкції. В масовому порядку приймаються принципово нові технічні рішення теплоізоляції будинків і споруд, використовуються новітні технології і матеріали. Це потребує суттєвої реформації методології проектування та створення нормативної бази з встановленням правил розробки сучасних конструктивних рішень та вимог до них з урахуванням особливостей розвитку як технічної бази, так і економічного стану держави. Підставою для проведення відповідного реформування є здійснення досліджень за енергетичними параметрами сучасних конструктивних рішень будівель, на основі яких приймаються рішення щодо їх застосування в практиці будівництва.

Шум, як один із фізичних факторів навколишнього середовища, в умовах сучасного суспільного життя став значним негативним соціальним явищем. Проблема захисту від шуму стала однією із найважливіших складових комплексу проблем екологічної безпеки навколишнього середовища.

Конструктивно-архітектурні рішення сучасних громадських будівель все частіше реалізуються з використанням скла в оздобленні фасаду. Відповідно, потребують розвитку нові принципи проектування стінових огорожувальних конструкцій з урахуванням сучасних архітектурних вимог та вимог з енергоефективності. Основне призначення світлопрозорих конструкцій полягає у виконанні функції освітлення приміщень та забезпеченні прямого зорового контакту між інтер'єром і зовнішнім середовищем. Теплотехнічні показники віконних конструкцій регламентуються на підставі забезпечення теплової ізоляції приміщення в холодний період року та теплозахисту в літні місяці. Вікна є не тільки елементом тепловтрат, але і джерелом теплонадходжень в зимовий період року, що потребує спеціальних досліджень світлопрозорості при виборі конструктивних рішень світлопрозорих елементів теплоізоляційної оболонки будівель.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Методологія експериментального комплексу побудована на моделі взаємодії елементів будівлі як єдиної енергетичної системи [1]. Основний вплив на формування теплового режиму, акустичного та світлового середовища і, відповідно, енергетичного статусу будівлі (енергетичних витрат на забезпечення необхідних умов комфортності) здійснює його ізоляційна оболонка. Об'ємно-планувальне рішення будівлі та конструктивні принципи ізоляційної оболонки обумовлюють ступінь корисного використання енергії сонця при кліматизації внутрішнього простору будівлі. Крім того, саме ця підсистема має найбільший потенціал в підвищенні енергоефективності будівель житлового та громадського призначення. Як цільова функція встановлюється завдання оптимізації цієї енергетичної підсистеми за енергетичними витрата-



ми на її створення та подальшу експлуатацію будівлі при забезпеченні необхідного теплового режиму в її приміщеннях.

Реалізація цього принципу на основі результатів експериментальних досліджень сучасних конструктивних систем ізоляційної оболонки будівель дозволила розробити комплекс норм та стандартів в галузі будівельної теплофізики та акустики [2-21].

Методологія побудови норм в галузі енергоефективності будівель висвітлена у роботах [22, 23].

### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Основною задачею даного дослідження є висвітлення питань методології експериментальних досліджень в галузі будівельної фізики.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Ізоляційна оболонка складається з непрозорих та світлопрозорих конструкцій, а за конструктивними ознаками – з огорожень підпілля та фундаменту, зовнішніх стін, перекриттів, покриттів та даху. Сучасні огорожувальні стінові конструкції є переважно багатошаровими і складаються з теплоізоляційного шару і захисних міцних та щільних шарів, які обумовлюють термічну неоднорідність конструкцій в цілому. Тому теплоізоляційні властивості визначаються експериментально та характеризуються приведеним опором теплопередачі огорожувальних конструкцій. Цей показник до введення сучасних норм [3, 4] був основним показником енергоефективності будівель.

Визначення цього показника здійснюється у кліматичних камерах, в яких імітуються розрахункові умови експлуатації, на які проектується будівля. Експериментальні дослідження дозволяють здійснити обґрунтований вибір конструктивних принципів огорожувальних конструкцій, проводити аналіз їх експлуатаційних властивостей з подальшою оптимізацією їх теплотехнічних показників та енергетичних характеристик будівель.

Дослідження в лабораторних камерних умовах при розрахункових теплових характеристиках проводяться за методичним алгоритмом, наведеним на рис. 1.

В процесі досліджень визначаються наступні теплофізичні характеристики теплоізоляційної оболонки будівлі та використовуються такі методичні принципи і засоби:

- температурні поля внутрішньої та зовнішньої поверхні огорожувальних конструкцій з використанням контактних та термографічних методів;
- густина теплових потоків через характерні зони зовнішніх стін контактним методом та неруйнівним (по тепловому принципу) методом дистанційного термографування;
- вологісний режим огорожувальних конструкцій (середня вологість теплоізоляційного шару

зовнішніх стін, характер розподілу вологості по товщі конструкції, динаміка зміни вологості стінових конструкцій) ваговим та кондуктометричними методами;

- температури, вологість та швидкість руху внутрішнього та зовнішнього повітря.

Методичною особливістю досліджень в умовах фізичного моделювання процесів тепломасопереносу в огорожувальних конструкціях є:

- комплексне визначення показників, що характеризують експлуатаційний енергетичний стан будівельних об'єктів – опір теплопередачі, температурний режим, вологість, повітропроникність, водонепроникність, світлопропускання теплоізоляційної оболонки та її елементів;
- використання різних фізичних методів при визначенні теплових характеристик конструкцій, а саме: тепловізійні вимірювання, на підставі яких оцінюється загальний характер теплового стану конструкцій та встановлюється наявність дефектних зон теплоізоляції; пірометричних вимірювань, на підставі яких визначаються чіткі геометричні характеристики дефектів теплоізоляції конструкцій для подальшого вимірювання температур та теплових потоків контактними методами, що забезпечує достовірність чисельного визначення значень приведенного опору теплопередачі термічно неоднорідних огорожувальних конструкцій, що досліджуються;
- дослідження вологісного стану конструкцій на підставі неруйнівного кондуктометричного та вагового методів забезпечує можливість визначення динаміки зміни вологості в часі при високому представництві отриманих даних.

Випробування в кліматичних камерах в умовах стаціонарної теплопередачі дають більш адекватну інформацію про теплоізоляційні властивості огорожувальних конструкцій в порівнянні з натурними випробуваннями внаслідок того, що в кліматичних камерах створюються тепловолгісні умови, на які огорожувальна конструкція проектується.

До комплектації кліматичної камери входять (рис. 2): компресори; система регулювання температури повітря у холодному відсіку для автоматичного підтримування заданої температури з точністю  $\pm 1$  °C; вентилятори, що забезпечують рівномірну подачу холодного повітря від охолоджуючих батарей по об'єму холодного відсіку та розрахункову швидкість руху повітря біля зовнішньої поверхні конструкцій, що випробуються; система регулювання температури та вологості повітря в теплом відсіку, що складається з датчиків температури та вологості повітря, регуляторів температури та вологості з точністю автоматичного підтримування заданої температури  $\pm 1$  °C, вологості  $\pm 5$  %; виконуючих механізмів; датчики контролю температури та вологості повітря в теплом та холодном

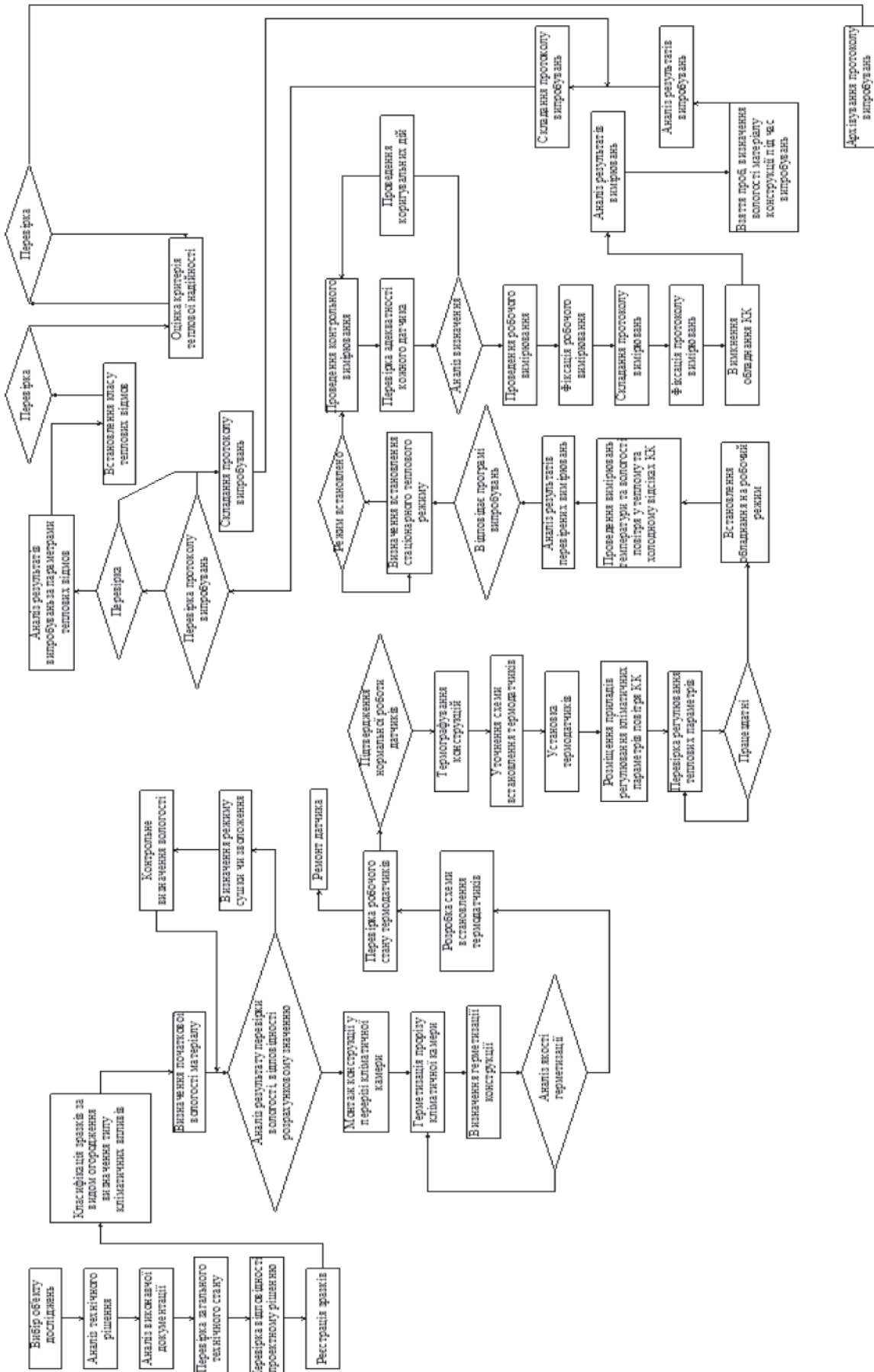
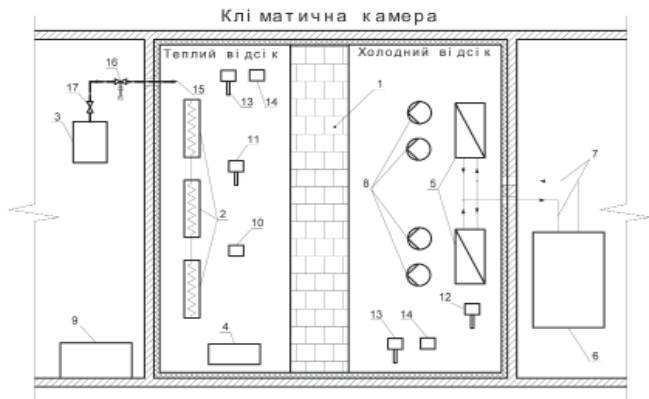


Рисунок 1 – Методичний алгоритм лабораторних камерних досліджень теплових характеристических огорджувальних конструкцій



**Рисунок 2** – Схема кліматичної камери для випробувань огорожувальних конструкцій з натуральними розмірами:

1 – випробувальна конструкція; 2 – нагрівальні прилади; 3 – парозволожувач; 4 – кондиціонер; 5 – охолоджуючі батареї; 6 – холодильне обладнання; 7 – трубопроводи холодоагенту; 8 – вентилятори; 9 – система автоматичного збору даних; 10 – датчик регулювання вологості повітря теплого відсіку; 11 – датчик регулювання температури повітря теплого відсіку; 12 – датчик регулювання температури повітря холодного відсіку; 13 – датчики контролю температури; 14 – датчики контролю вологості; 15 – паропровід; 16 – регулююча заслінка; 17 – затворний кран

му відсіках кліматичної камери; обладнання для реєстрації параметрів.

Особливістю кліматичної камери ДП НДІБК є те, що в ній моделюються теплові умови, що є тотожними до умов, які формують тепловий режим конструкцій під час експлуатації будівель. Розміри кліматичної камери дозволяють забезпечувати вільний рух повітря по внутрішньому відсіку кліматичної камери та природне співвідношення між конвективною та променевою складовими у теплообміні між поверхнею конструкції, що досліджується, та внутрішнім середовищем. При цьому забезпечуються теплові умови експлуатації рядової квартири у багатоповерховій будівлі.

У зовнішньому відсіку кліматичної камери задаються значення розрахункової температури зовнішнього повітря та умови примусового теплообміну за рахунок направленої дії вентиляторів, які імітують вітрові умови, що є характерними для кліматичних зон України.

Вид конструкцій під час їх монтажу у кліматичну камеру та під час проведення експериментальних досліджень наведено на рис. 3.

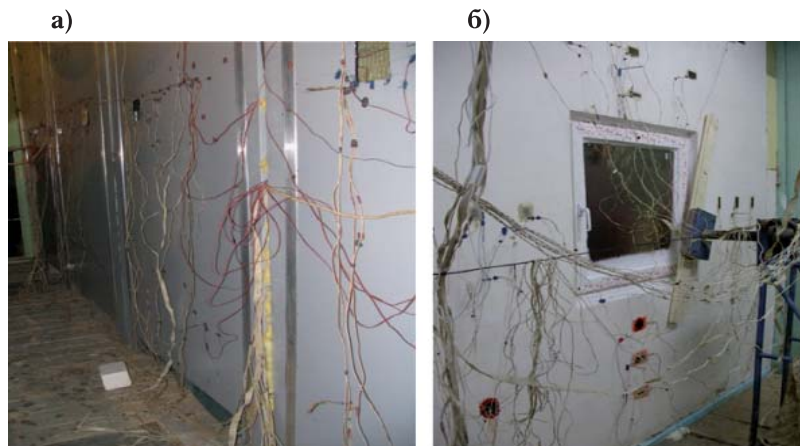
Опір теплопередачі більшості світлопрозорих конструкцій, що застосо-

вуються у практиці будівництва, є меншим  $1 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ , тому забезпечення умов теплообміну між дослідною конструкцією та оточуючим середовищем суттєво впливає на точність експериментального визначення цього фізичного показника. Якщо коефіцієнт теплообміну між внутрішнім середовищем та внутрішньою поверхнею дослідної конструкції нижче ніж  $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ , а коефіцієнт теплообміну між зовнішнім середовищем та зовнішньою поверхнею нижче ніж  $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ , похибка визначення опору теплопередачі конструкції може скласти більше 30%.

Механізм утворення вільної конвекції біля холодної ізотермічної поверхні скління під час експлуатації у зимовий період року характерний тим, що прилягаючі до скління охолоджені шари мають густину більшу, ніж повітря в приміщенні. Охолоджені шари повітря витісняють менш щільні, у результаті чого виникає його рух зверху вниз.

Температура в прикордонному шарі монотонно підвищується, біля теплої поверхні скління механізм утворення вільної конвекції аналогічний, з тією лише різницею, що прилягаючі до скління шари мають меншу щільність, ніж навколишнє повітря, і підіймно-опускний рух повітря відбувається назад руху біля холодної поверхні. Профілі швидкості, температури й інтенсивності теплообміну залежать від режиму руху повітря в прикордонному шарі: він може бути ламінарним, перехідним, турбулентним.

Конструкція кліматичної камери для випробувань світлопрозорих конструкцій забезпечує виконання названих умов щодо коефіцієнтів теплообміну, які є ідентичними до їх значень під час експлуатації світлопрозорих конструкцій у складі теплоізоляційної оболонки будівель. Розміри та геометрія кліматичної камери дозволяють забезпечувати вільний рух повітря по внутрішньому відсіку кліматичної камери та природне співвідношення між конвективною та променевою складовими у теплообміні між поверхнею конструкції, що досліджується, та внутрішнім середовищем. Вид дослідних світлопрозорих конструкцій під час



**Рисунок 3** – Вид дослідних конструкцій під час випробувань з внутрішнього (а) та зовнішнього (б) відсіку кліматичної камери



випробувань у кліматичній камері наведено на рис. 4.

Особливістю в тепловому відношенні конструкцій фасадної теплоізоляції зі світлопрозорим зовнішнім шаром є те, що цей вид огорожувальних конструкцій одночасно визначає як тепловтрати приміщення, так і його теплопостачання. Для непрозорих конструкцій тепловий потік в холодну пору року завжди направлений у бік зовнішнього середовища. Для прозорих конструкцій тепловий потік в сонячну погоду має двосторонню направленість і, в залежності від властивостей перерахованих вище конструктивних елементів системи утеплення, баланс теплових потоків (теплопритоки-тепловтрати) може бути позитивним і при низьких температурах зовнішнього повітря.

За тепловим принципом роботи стіни з світлопрозорим зовнішнім шаром є пасивними геліоконструкціями, які можна використовувати як елементи теплопостачання. Особливо це відноситься до комбінованих фасадних систем. Для будівель, що експлуатуються у кліматичних умовах України, насамперед необхідно проводити дослідження ефекту впливу на енергетичні показники конструкцій теплонадходжень від сонячної радіації у холодний період року. До складу експериментального комплексу будівельної фізики входить експериментальна установка з проведення досліджень енергетичних властивостей будівель комбінованих світлопрозорих конструкцій з імітацією умов зимових сонячних днів. Схема установки наведена на рис. 5.

При проведенні досліджень здійснюється імітація зимового сонячного дня з постійною добовою температурою  $(-10 \div -25) \text{ }^\circ\text{C}$  та змінним значенням інтенсивності сонячного опромінювання від 10 до  $100 \text{ Вт/м}^2$  в залежності від визначеного розташування світлопрозорої конструкції у фасаді відносно сторін світу. Вимірювання ефективності встановлюється за показниками зміни температури внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції протягом доби та зміни значення та напрямлення теплових потоків крізь огорожувальну конструкцію протягом часу експерименту.

Зазначимо, що за результатами досліджень визначені конструктивні рішення конструкції з теплоаккумуляційним та світлопрозорим шарами, які при імітації двох зимових днів з незмінною температурою зовнішнього повітря до мінус  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  та двома поспіль сонячними днями забезпечують зміну напрямку теплового потоку – у другу сонячну добу тепловий потік направлений вже

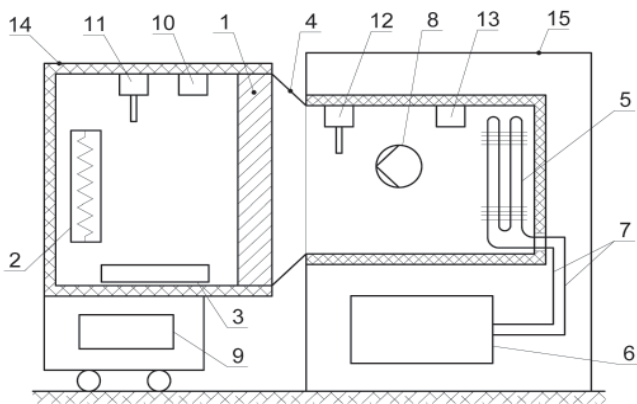


**Рисунок 4** – Дослідження світлопрозорих огорожувальних конструкцій у кліматичній камері

не з приміщення назовні, а зі сторони «вулиці» в приміщення. Відповідно, відбувається обігрів приміщення сонячною енергією при температурі зовнішнього повітря мінус  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### **Кліматична камера для випробувань теплової надійності теплоізоляційних матеріалів та виробів**

Теплова надійність – це властивість об'єкта (огорожувальної конструкції, теплоізоляційного матеріалу або виробу) зберігати у часі в установленних межах значення параметрів, що характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, тобто зберігати свої теплотехнічні показники та теплофізичні властивості у допустимих межах у заданий термін експлуатації будівлі. Теплотехнічні показники конструкцій визначають характеристику безпеки будівлі – енергетичну безпеку та рівень забезпечення теплового комфорту в приміщеннях. Теплова надійність огорожувальних конструкцій є обов'язковою характеристикою енергоефективності будівлі – будівля не може бути ефективною в експлуатації з ненадійними в теплоізоляційному відношенні огорожувальними конструкціями.



**Рисунок 5** – Схема експериментального обладнання кліматичної камери для випробувань світлопрозорих конструкцій з імітацією кліматичних впливів та сонячної радіації

1 – досліджувана конструкція; 2 – нагрівачі; 3 – посудина з розчином для підтримання вологості; 4 – перехідна діафрагма; 5 – випарник; 6 – холодильне обладнання; 7 – трубопроводи холодоагенту; 8 – вентилятор; 9 – система автоматичного збору даних та регулювання; 10 – датчик контролю вологості повітря в приставному теплому відсіку; 11 – датчик контролю та регулювання температури повітря в приставному теплому відсіку; 12 – датчик контролю та регулювання температури повітря в робочому об'ємі кліматичної камери; 13 – датчик контролю та регулювання вологості в робочому об'ємі кліматичної камери; 14 – приставний теплий відсік; 15 – кліматична камера

До складу випробувального теплофізичного комплексу ДП НДІБК входять кліматичні камери для випробувань показників теплової надійності теплоізоляційних матеріалів та виробів, конструкцій фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками, конструкцій фасадної теплоізоляції з вентиляльованим повітряним прошарком та індустріальним опорядженням, стенд для випробувань у натурних умовах експлуатації.

Вид кліматичних камер для випробувань показників теплової надійності теплоізоляційних матеріалів та виробів наведено на рис. 6.

Суть методу полягає в тому, що матеріал, який випробовується, піддають циклічним кліматичним впливам, що імітують умови експлуатації матеріалу в огорожувальних конструкціях, та визначають зміни теплофізичних характеристик матеріалу. За результатами вимірювань теплофізичних характеристик оцінюють термін ефективної

експлуатації матеріалу в залежності від конструктивного рішення теплоізоляції огорожувальних конструкцій.

Методологія експериментальних досліджень теплової надійності будівельних конструкцій детально освітлена у роботах [1, 24] та реалізована у стандартах [10, 21, 25].

#### **Кліматична камера для випробувань теплової надійності конструкцій фасадної теплоізоляції з вентиляльованим повітряним прошарком та індустріальним опорядженням**

Основна конструктивна особливість цього класу конструкцій фасадної теплоізоляції – це вентиляльований повітряний прошарок в товщі системи утеплення, що обумовлює необхідність захисту конструкції від наслідку цієї вентиляції. Для забезпечення необхідних теплоізоляційних властивостей стінової конструкції при застосуванні волокнистих теплоізоляційних матеріалів, що мають високі характеристики повітропроникності, необхідно вводити конструктивні елементи, що обмежують можливість проникнення холодного повітря в товщу теплоізоляції.

Наявність вентиляльованого повітряного прошарку суттєво впливає на показники теплової надійності конструкцій. Зміна експлуатаційних показників обумовлюється не тільки кліматичною деструкцією теплоізоляційного шару, але і пошкодженням цього шару внаслідок повітряних потоків, які постійно циркулюють вздовж поверхні теплоізоляційного матеріалу по висоті конструкції. Волокнистий склад утеплювача обумовлює його суттєву схильність



**Рисунок 6** – Вид кліматичних камер із дослідними зразками для випробувань показників теплової надійності



до аеродинамічної деструкції цього конструктивного шару. Напруги розтягу в перетині волокон та дотичні напруги в крапельках зв'язуючого, що закріплює волокна в матеріалі, пропорційні середній силі аеродинамічного впливу. При порушенні цілісності зв'язуючого зникають сили зчеплення волокон в матеріалі, які пропорційні пружній силі контакту перекручених волокон в шарі матеріалу та коефіцієнтам тертя (сухого та в'язкого). Аеродинамічна сила складається з квазістаціонарної складової, яка пропорційна середній швидкості руху повітря, та пульсаційної складової, яка обумовлена хаотичними турбулентними пульсаціями, що завжди присутні в потоці повітря біля шорсткуватої поверхні.

В основу методики оцінки показників теплової надійності конструкцій фасадної теплоізоляції з вентиляльованим повітряним прошарком покладено гіпотезу накопичення напруги у волокнах матеріалу внаслідок дії аеродинамічних впливів до критичного рівня, при якому волокна відриваються від тіла матеріалу та виносяться повітряним потоком. Методика передбачає експериментальну оцінку впливу фільтрації на теплові показники стінової огорожувальної конструкції із системою утеплення в цілому в розрахункових теплових умовах – оцінку фільтраційно-теплового ефекту та оцінку змін в часі теплових показників огорожувальної конструкції внаслідок емісії волокон у вентиляційний потік повітряного прошарку системи утеплення – ресурсно-ізоляційного ефекту, з урахуванням теплоаеродинамічних особливостей експлуатації цих систем утеплення.

Для забезпечення імітації умов експлуатації багатоповерхових будівель, крім вітрового потоку зовнішнього середовища, при проведенні досліджень здійснюється примусова вентиляція їх повітряних прошарків з відповідним значенням необхідної витрати повітря крізь прошарок. В умовах експерименту встановлюється не різниця тиску, яка залежить від багатьох параметрів і не є чітким експериментальним параметром, а витрати повітря в розрахункових умовах, які забезпечуються роботою вентиляторів через витяжні короби, що встановлюються у верхній частині дослідних конструкцій, та здійснюється примусовий рух повітря по висоті прошарку знизу вгору (рис. 7) зі швидкістю руху повітря у прошарку систем утеплення від робочих експлуатаційних значень до максимально можливих значень. Контроль швидкості руху повітря здійснюється на вході у повітряний прошарок конструкції по його центру та виходу.

В результаті випробувань визнача-

ються показники опору теплопередачі в початковому стані конструкції  $R_{20}$  та, в залежності від швидкості руху повітря, в прошарку  $R_{20}(V)$ , а також характер розподілу температур по товщині конструкцій в залежності від аеродинамічних режимів.

Ресурсно-ізоляційні показники оцінюються при довготерміновому створенні перепадів тиску по висоті дослідного фрагменту з забезпеченням постійного руху повітря у прошарку конструкції зі швидкістю від 0,3 до 1,5 м/с, тобто значеннях перепадів тиску і, відповідно, швидкості руху повітря у прошарках, які відповідають умовам теплоаеродинамічного режиму у повітряному прошарку систем утеплення для багатоповерхових будівель. В такому режимі аеродинамічного навантаження конструкції працюють протягом не менше ніж 100 діб. Вид дослідних конструкцій під час випробувань у кліматичній камері наведено на рис. 8.

#### **Натурний стенд для досліджень теплотехнічних показників і теплової надійності будівельних теплоізоляційних матеріалів і виробів**

До складу експериментального обладнання відділу будівельної фізики та енергоефективності входить спеціальний натурний стенд, що представляє собою об'єм з внутрішніми розмірами 3 м шириною, 4 м довжиною та 3 м висотою, виконаний з залізобетону завтовшки 300 мм (стіни) та 150 мм (покриття). В стінах натурального стенду передбачені отвори для влаштування відповідної стінової конструкції або теплоізоляційного виробу. Шар (або декілька різних шарів) теплоізоляційного матеріалу монтується на горизонтальній та вертикальних поверхнях. Схему



**Рисунок 7** – Система забезпечення необхідних витрат повітря в прошарку конструкцій під час випробувань в кліматичній камері



**Рисунок 8** – Проведення досліджень показників теплової надійності конструкцій фасадної теплоізоляції у кліматичній камері





та вид натурального стенду наведено на рис. 9.

У внутрішньому просторі встановлені прилади для обігріву, зволоження та руху повітря внутрішнього середовища, змонтовано вимірювальне обладнання для фіксації параметрів внутрішнього та зовнішнього повітря.

В автоматичному режимі підтримується температура та відносна вологість внутрішнього повітря. Коливання показників не перевищує відповідно 1 К та 5 %.

Температурний перепад контролюється в межах показників початку опалювального періоду та при фіксації розрахункової температури зимового періоду під час п'ятиденного робочого тижня в січні. При наявності в натурних умовах меншого або більшого перепаду температур на встановлений проміжок часу випробувань перепад автоматично коригується за рахунок підвищення або зниження температури внутрішнього повітря.

Теплофізичні властивості будівельних матеріалів (теплопровідність, паропроникність, сорбція, повітропроникність) досліджуються у експериментальних установках, що постійно проходять відповідне метрологічне калібрування. Причому, теплопровідність визначається як при температурах  $+ (20 \div 30) \text{ }^\circ\text{C}$ , так і при температурі  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$  згідно з вимогами європейських стандартів, а також при температурах від  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ , що є характеристикою переносу теплоти через огорожувальні конструкції в кліматичних умовах України. Вид експериментальних установок для випробувань теплопровідності в залежності від температури наведений на рис. 10.

Конструктивно-архітектурні рішення сучасних громадських будівель все частіше реалізуються з використанням скла в оздобленні фасаду. Відповідно, потребують розвитку нові принципи проектування стінових огорожувальних конструкцій з урахуванням сучасних архітектурних вимог та вимог з енергоефективності. На перший план виходять проблеми досліджень енергетичних характеристик світлопрозорих конструкцій і здійснення розробок на підставі цих досліджень раціональних інженерних методів оцінювання та проектування стінових огорожувальних конструкцій з високими коефіцієнтами скління фасаду багатопверхових будівель.

Основне призначення світлопрозорих конструкцій полягає у виконанні функції освітлення приміщень та забезпеченні прямого зорового контакту між інтер'єром і зовнішнім середовищем. Вікна є не тільки елементом тепловтрат, але і джерелом теплонадходжень в зимовий період року. Тому ці питання потребують спеціальних досліджень світлопрозорості склопакетів

та віконних конструкцій, що здійснюються на експериментальній установці, загальний вид якої наведено на рис.11.

Звукоізоляція – найбільш ефективний метод захисту приміщень від шуму внутрішніх і зовнішніх джерел. Для забезпечення нормативного шумового режиму в приміщеннях житлових і громадських будівель звукоізоляція від повітряного шуму огорожувальних конструкцій (внутрішніх і зовнішніх) і звукоізоляція від ударного шуму міжповерхових перекриттів повинна відповідати нормативним вимогам.

Звукопоглинальні конструкції (підвісні звукопоглинальні стелі, акустичне облицювання стін, підвісні об'ємні штучні звукопоглиначі) застосовують для зниження рівнів шуму в приміщеннях з джерелами шуму на промислових підприємствах, для забезпечення комфортних акустичних умов в приміщеннях громадських і адміністративних будівель (читальні зали бібліотек, виставкові зали, зали засідань, торговельні зали, спортивні зали, зали очікування залізничних, аеро- і автовокзалів, приміщення загального користування готелів, зали їдалень, кафе і ресторанів тощо), а також для корекції акустичних характеристик в театральних і концертних залах, конференц-залах тощо.

Для захисту прилеглих територій від транспортного шуму і шуму локальних джерел застосовують шумозахисні екрани різних конструктивних рішень від самих простих конструкцій (наприклад, бетонна або цегляна стінка) до складних багатопверхових полегшених, виконаних із різних матеріалів, які одночасно можуть виконувати як функцію



Рисунок 9 – Загальний вигляд та схема-план експериментального стенду



Рисунок 10 – Вид експериментальних установок для випробувань теплопровідності будівельних матеріалів в залежності від температури



звукоізоляції, так і функцію звукопоглинання.

З огляду на те, що надійні теоретичні методи розрахунку звукоізоляції будівельних конструкцій розроблені для відносно обмеженого переліку конструктивних рішень огорожень, виготовлених з матеріалів з достатньо вивченими фізико-технічними характеристиками, на даний час основним методом досліджень звукоізоляції огорожувальних конструкцій від повітряного і ударного шуму складних конструкцій, конструкцій з нових матеріалів, багатошарових конструкцій, конструкцій з матеріалів, виготовлених за новими технологіями, конструкцій на стадії їх технологічної розробки з наперед заданими акустичними характеристиками тощо є метод експериментальних досліджень в лабораторних і натурних умовах, який забезпечує найбільш точні і надійні результати.

Шумові характеристики (рівні звукової потужності) є паспортною акустичною характеристикою машин, технологічного та інженерного обладнання. Ця характеристика є важливим показником якості машин і обладнання. Шумові характеристики є вихідними даними для проведення акустичного розрахунку очікуваних рівнів шуму, створюваного даним джерелом (джерелами) в приміщеннях або на територіях, та проектування будівельно-акустичних заходів по зниженню шуму.

Крім того, шумові характеристики необхідні для порівняння однотипних і різних машин за шумністю, а також для здійснення заходів зі зниження шуму як існуючих, так і машин і обладнання, які заново конструюють.

Звукову потужність джерел шуму на даний час визначають тільки шляхом вимірювань, головним чином, в спеціальних ревербераційних або заглушених звукомірних камерах.

В ДП НДІБК створено унікальний, єдиний в Україні акустичний випробувальний комплекс, який дозволяє проводити випробування і дослідження будівельних конструкцій, виробів і матеріалів за усіма акустичними показниками, а також визначати шумові характеристики машин, технологічного і інженерного обладнання, побутової техніки.

Акустичний випробувальний комплекс ДП НДІБК складається з таких випробувальних установок:

- звукомірна камера дифузного звукового поля (ревербераційна) – поз. 1, рис. 12;
- три звукомірні камери дифузного звукового поля (ревербераційні) для вимірювань звукоізоляції огорожувальних конструкцій:
  - а) ревербераційна звукомірна камера висо-



а)

б)

**Рисунок 11** – Загальний вид експериментальної установки з визначення коефіцієнту направленої пропускання світла та вид дослідних зразків склопакету (а) та віконної конструкції (б) у експериментальній установці

- кого рівня (КВР) – поз. 2, рис. 12;
  - б) ревербераційна звукомірна камера низького рівня 1 (КНР-1), розташована суміжно з КВР по горизонталі, – поз. 3, рис. 12;
  - в) ревербераційна звукомірна камера низького рівня 2 (КНР-2), розташована суміжно з КВР по вертикалі, – поз.4, рис. 12;
  - звукомірна камера вільного звукового поля (заглушена) – поз. 5, рис. 12;
  - акустичний канал (поз. 6, рис. 12) і акустичний інтерферометр (окрема установка заводського виробництва).
- Ревербераційна звукомірна камера призначена:
- для вимірювань звукопоглинальних характеристик матеріалів, виробів і конструкцій, а саме: ревербераційного коефіцієнта звукопоглинання і еквівалентної площі звукопоглинання плоских звукопоглинальних конструкцій і об'ємних (штучних) звукопоглиначів в третиннооктавних (октавних) смугах нормованого частотного діапазону;
  - для вимірювань шумових характеристик джерел шуму (машин, технологічного і інженерного обладнання), а саме: рівнів звукової потужності в третиннооктавних (октавних) смугах



вимірювального діапазону частот та коригованого рівня звукової потужності.

Вимірювання звукопоглинання проводяться за стандартною методикою згідно з ДСТУ ISO 354:2007 [26].

Вимірювання шумових характеристик проводяться за стандартною методикою згідно з ДСТУ EN ISO 3741:2014 [27].

Необхідна дифузність звукового поля в ревербераційній камері забезпечується завдяки таким властивостям і заходам:

- складною неправильною формою камери, при якій відсутні будь-які паралельності між собою стін, підлоги і стелі;
- забезпеченням для ревербераційних камер необхідної умови:

$$L_{\text{макс}} = 1,9V^{1/3} \quad (1)$$

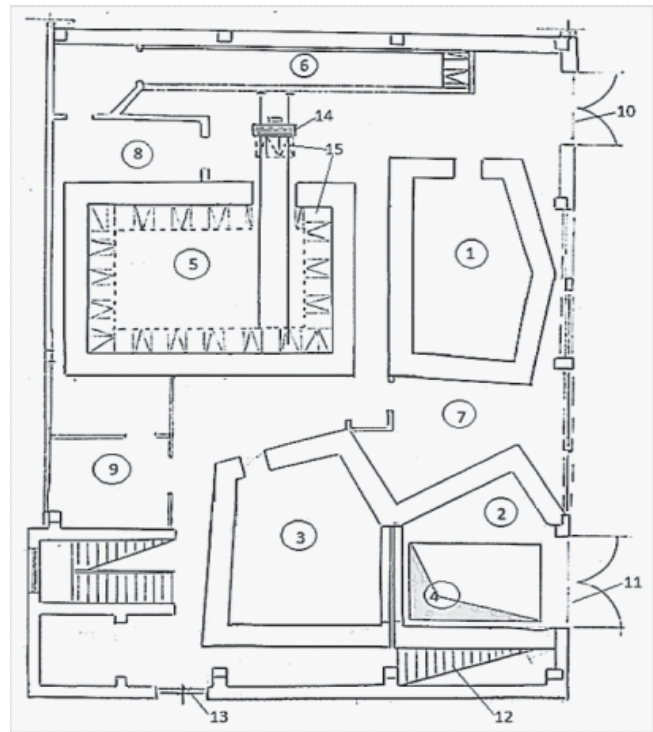
де  $L_{\text{макс}}$  – довжина найдовшої прямої лінії в межах камери (найдовша діагональ), м;  $V$  – об'єм камери, м<sup>3</sup>;

- забезпеченням вимоги до ревербераційних камер щодо співвідношення будь-яких двох геометричних розмірів камери, при якому ці співвідношення не повинні дорівнювати співвідношенню малих цілих чисел;
- високій звуковідбивній здатності внутрішніх поверхонь огорожувальних конструкцій камери, при якій звукові хвилі практично повністю відбиваються від жорстких і гладких поверхонь камери (коефіцієнт звукопоглинання поверхонь камери не перевищує 0,03, а коефіцієнт відбиття звукових хвиль від поверхонь камери становить не менше ніж 0,98);
- раціональному розміщенню джерел звуку (гучномовців) для збудження звукового поля в камері (а саме, поблизу тригранних кутів камери – в зоні пучності звукового тиску), при якому забезпечується збудження всього спектру власних частот об'єму камери;
- застосуванню для збудження звукового поля в камері акустичного сигналу з суцільним спектром (білого чи рожевого шуму) або імпульсного сигналу, наприклад, пострілом із стартового пістолета.

Геометричні і акустичні характеристики ревербераційної камери ДП НДІБК відповідають вимогам [27]. Приклади проведення випробувань наведені на рис. 13, 14.

До ревербераційних звукомірних камер, призначених для вимірювання звукоізоляції будівельних конструкцій ревербераційним методом, висуваються вимоги щодо:

- об'ємів і форми камер;
- співвідношення між об'ємом камери високого рівня та об'ємами камер низького рівня;
- площі випробувальних зразків стін, перегородок, міжповерхових перекриттів та



**Рисунок 12** – План акустичного випробувального комплексу:

1 – ревербераційна звукомірна камера; 2 – ревербераційна звукомірна камера високого рівня (КВР); 3 – ревербераційна звукомірна камера низького рівня 1 (КНР-1); 4 – ревербераційна звукомірна камера низького рівня 2 (КНР-2); 5 – заглушена звукомірна камера; 6 – акустичний канал; 7 – апаратна № 1; 8 – апаратна № 2; 9 – комора для вимірювальної апаратури; 10 – входні двостулкові ворота в зал комплексу; 11 – двостулкові ворота звукомірної камери високого рівня (КВР); 12 – сходи у ревербераційну звукомірну камеру низького рівня 2 (КНР-2), розташовану у підвалі під звукомірною камерою високого рівня (КВР); 13 – запасний вихід із зали комплексу; 14 – відкочувальні двері заглушеної камери на рейках; 15 – звукопоглинальне облицювання заглушеної камери

співвідношення їх геометричних розмірів;

- дифузності звукового поля в камерах;
- рівнів шумових завад в камерах низького рівня (рівнів шуму, що проникає в камери ззовні);
- непрямої передачі повітряного і ударного шуму обхідними шляхами (в обхід випробувальної конструкції);
- параметрів несучої стандартної плити міжповерхового перекриття для вимірювання поліпшення ізоляції ударного шуму підлогами або підлоговими покриттями.

Необхідна дифузність звукового поля в камерах забезпечується завдяки складній формі; непаралельності стін, підлоги і стелі; відповідного



співвідношення геометричних розмірів камер; високої звуковідбивної здатності внутрішніх поверхонь камер; застосування для створення звукового поля акустичного сигналу із суцільним спектром тощо.

Мірою якості дифузності звукового поля в камерах є величина середньоквадратичного відхилення рівнів звукового тиску у вимірювальному об'ємі камер від середнього значення. Величина цього показника не перевищує в камерах

роджувальними конструкціями будівель різного призначення: стіни, перегородки, перекриття, двері, вікна тощо) і ізоляцію ударного шуму міжповерховими перекриттями.

Існує кілька методів вимірювання звукоізоляції: ревербераційний метод, метод з використанням заглушених камер, кореляційний і імпульсний методи тощо. Кожний із цих методів призначений для вирішення певних експериментальних і прикладних задач. Найбільш універсальним є ревербераційний метод. Міжнародна організація зі стандартизації рекомендує саме цей метод для вимірювання звукоізоляції огорожень в лабораторних і натурних умовах.

Згідно з ревербераційним методом, для вимірювання звукоізоляції тієї чи іншої конструкції, цю конструкцію необхідно встановити між двома ревербераційними звукомірними камерами, звукове поле в яких є дифузним.

Принципова схема комплексу трьох звукомірних камер ДП НДІБК, призначених для вимірювання звукоізоляції будівельних конструкцій ревербераційним методом, наведена на рис. 15.

Пара суміжних по горизонталі звукомірних ревербераційних камер (КВР і КНР-1) призначена:

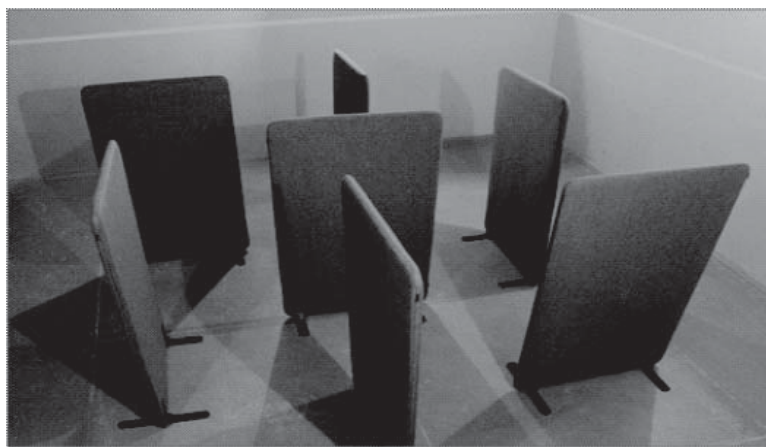
- для вимірювання ізоляції повітряного шуму ( $R$ , дБ) вертикальними будівельними конструкціями (внутрішніми стінами, фасадами, перегородками, вікнами, дверима, конструкціями шумозахисних екранів тощо) в смугах частот нормованого діапазону;
- для вимірювання поліпшення ізоляції повітряного шуму ( $\Delta R$ , дБ) вертикальних будівельних конструкцій при застосуванні додаткових облицювань (обшивок) різних конструктивних рішень в смугах частот нормованого діапазону.

Пара суміжних по вертикалі звукомірних ревербераційних камер (КВР і КНР-2) призначена:

- для вимірювання ізоляції повітряного шуму ( $R$ , дБ) міжповерховими перекриттями і покриттями будівель різного призначення в смугах частот нормованого діапазону;
- для вимірювання ізоляції ударного шуму ( $L_n$ , дБ) міжповерховими перекриттями в смугах частот нормованого діапазону,
- для вимірювання поліпшення ізоляції ударного шуму ( $\Delta L_n$ , дБ) міжповерхових перекриттів застосуванням плаваючих підлог або підлогових покриттів в смугах частот нормованого діапазону;



**Рисунок 13** – Вимірювання звукопоглинальних характеристик матеріалів в звукомірній ревербераційній камері



**Рисунок 14** – Вимірювання звукопоглинальних характеристик штучних виробів

1,5 дБ в діапазоні низьких частот нормованого діапазону і 0,7 дБ в діапазоні середніх і високих частот, що свідчить про достатню дифузність звукового поля.

Незначні за величиною рівні шумових заводів в камері (які не впливають на результати вимірювань) забезпечуються, по-перше, тим, що камера розташована всередині будівлі на окремому фундаменті (по принципу «коробка в коробці») і, по-друге, завдяки високій звукоізоляції масивних стін, масивного перекриття і масивних звукоізолювальних тамбурних дверей.

В залежності від способу збудження коливань будівельних конструкцій розрізняють два види ізоляції: ізоляцію повітряного шуму будівельними конструкціями (внутрішніми і зовнішніми ого-



- для вимірювання поліпшення ізоляції повітряного ( $\Delta R$ , дБ) і ударного ( $\Delta L_d$ , дБ) шуму міжповерхових перекриттів при застосуванні підвісних звукоізолювальних стель в смугах частот нормованого діапазону.

Для створення відповідних рівнів звукового тиску в камері високого рівня при вимірюваннях ізоляції повітряного шуму стін, перегородок, перекриттів застосовується передавальний тракт, який містить:

- генератор білого (або рожевого) шуму;
- третиннооктавні (октавні) електричні фільтри;
- підсилювач звукової потужності;
- гучномовці.

При вимірюваннях ізоляції ударного шуму як джерело ударного шуму застосовується стандартна ударна машина, яка відповідає таким вимогам: 5 молотків вагою по 0,5 кг, розташовані на одній прямій лінії. Відстань між молотками становить 100 мм. Швидкість падіння молотків відповідає вільному падінню з висоти 40 мм. Тривалість часу між двома послідовними ударами молотків – 100 мс. Частота ударів молотків – 10 Гц.

Вимірювання рівнів звукового тиску в камерах і часу реверберації звуку в камерах низького рівня здійснюється за допомогою приймального тракту, який містить ненаправлені вимірювальні мікрофони, аналізатор звуку (спектрометр), самописець рівня.

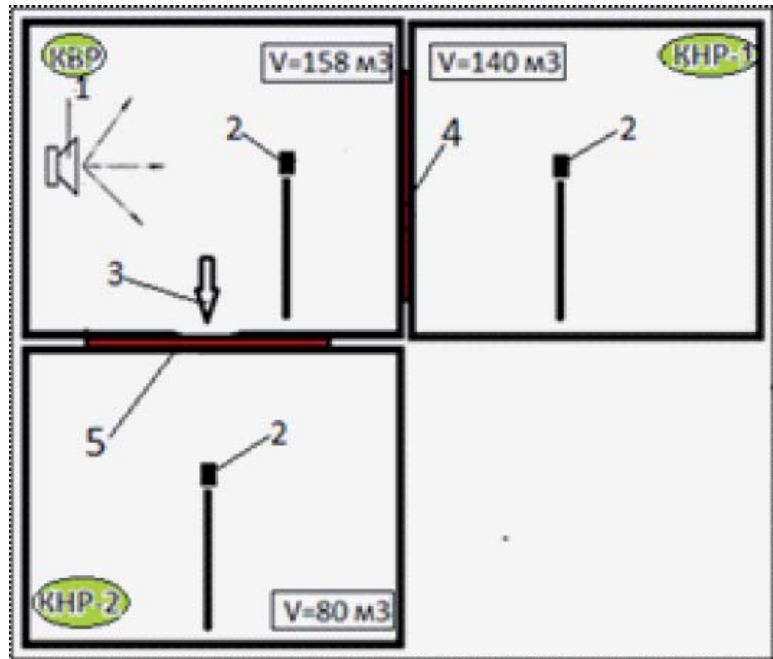
Вид конструкцій при проведенні випробувань їх звукоізоляції з боку камери низького тиску наведено на рис. 16.

Вільне звукове поле – це звукове поле у безмежному гомогенному ізотропному середовищі, в якому поширюються тільки біжучі звукові хвилі і відсутні відбиті звукові хвилі від будь-яких перешкод.

Основною характеристикою вільного звукового поля є обернено пропорційна залежність рівня звукового тиску джерела звуку від відстані до джерела, тобто, при кожному подвоєнні відстані від джерела рівень звукового тиску знижується на 6 дБ (закон обернено пропорційної залежності).

Вільне звукове поле створюється у заглушеній камері, в якій енергія звукових хвиль практично повністю поглинається при падінні на огорожувальні поверхні, що дозволяє вимірювати:

- шумові характеристики джерел шуму (машин, технологічного і інженерного обладнання), а саме: рівнів звукової потужності в третиннооктавних (октавних) смугах частот та коригованого рівня звукової потужності;



**Рисунок 15** – Принципова схема лабораторного комплексу ревербераційних камер для вимірювання звукоізоляції будівельних конструкцій і виробів

1 – джерело повітряного шуму (гучномовці) в камері високого рівня (КВР); 2 – ненаправлені вимірювальні мікрофони; 3 – джерело ударного шуму (стандартна ударна машина); 4 – проріз між КВР і КНР-1 для встановлення вертикальних випробувальних конструкцій (стін, перегородок тощо); 5 – проріз між КВР і КНР-2 для встановлення випробувального міжповерхового перекриття

- характеристики спрямованості випромінювання шуму джерелом, показника спрямованості і коефіцієнта спрямованості випромінювання.

Крім того, в камері проводяться вимірювання характеристик електроакустичних приладів, систем і випромінювачів (амплітудно-частотні характеристики, діаграми спрямованості тощо), а також експериментальні дослідження акустичної ефективності засобів зниження шуму в умовах вільного звукового поля.

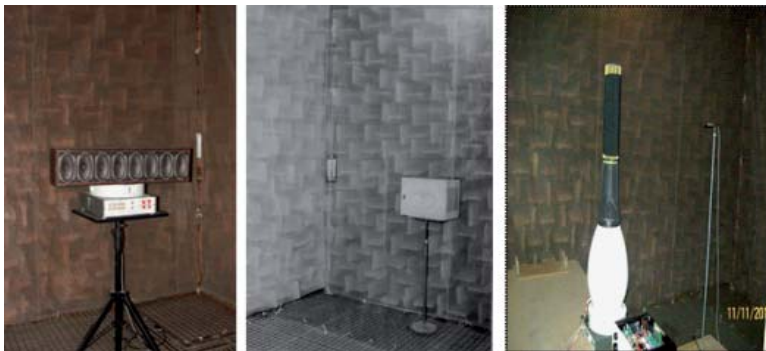
Для створення в камері вільного звукового поля коефіцієнт звукопоглинання конструкції акустичного облицювання внутрішніх поверхонь камери повинен бути не менше ніж 0,97 – 0,99 в діапазоні частот вимірювань.

Для забезпечення цієї умови для облицювання камери застосована найбільш ефективна звукопоглинальна конструкція – клиновидна, яка забезпечує плавний перехід від малого акустичного опору повітря в камері до великого акустичного опору огорожень камери.

Від довжини клина залежить нижня частота вимірювального діапазону, при якій забезпечується необхідна величина коефіцієнта звукопоглинання



**Рисунок 16** – Випробування звукоізоляції світлопрозорих конструкцій



**Рисунок 17** – Вимірювання характеристик акустичних систем і гучномовців в заглушеній камері



**Рисунок 18** – Експериментальні дослідження акустичної ефективності шумозахисних екранів в заглушеній камері (на фізичних моделях)

(чим більша довжина, тим нижча нижня гранична частота).

Клиновидною конструкцією облицьовані усі поверхні камери, включаючи і підлогу (камера ДП НДІБК – камера із звукопоглинальною підлогою, на відміну від іншого типу існуючих заглушених камер із твердою звуковідбивною підлогою). Для підвищення звукопоглинання на низьких частотах між клиновидною конструкцією і поверхнями огорожень передбачено заклиновий повітряний прошарок шириною 200 мм, наполовину заповнений

ефективним волокнистим звукопоглинальним матеріалом. Загальна товщина звукопоглинальної конструкції камери становить 1,2 м. Коефіцієнт звукопоглинання такої конструкції становить 0,99, починаючи з частоти 63 Гц.

Вид виробів та конструкцій під час випробувань у заглушеній акустичній камері наведений на рис.17, 18.

## ВИСНОВКИ

Науково-дослідний «Експериментальний комплекс з досліджень в галузі будівельної фізики» ДП НДІБК включає унікальне експериментальне устаткування з комплексних досліджень будівельних матеріалів, виробів і конструкцій за теплотехнічними, теплофізичними, акустичними та світлотехнічними показниками і за своїми технічними характеристиками є унікальним спеціалізованим центром наукових досліджень в галузі будівельної фізики і енергоефективності, що має визначне науково-практичне значення для будівельної галузі та економіки України.

Роботи на експериментальному комплексі направлені на забезпечення дієвості теоретичних і конструкторських розробок, розвиток наукових основ будівельної теплофізики, довговічності і надійності будівельних виробів матеріалів і конструкцій.

На базі випробувального комплексу проводяться кваліфікаційні і сертифікаційні випробування і дослідження властивостей будівельних матеріалів, виробів і конструкцій за показниками: опір теплопередачі, повітропроникність, водонепроникність, опір вітровому навантаженню, опір статичному навантаженню до дії на обмежувач кута відчинення стулки, загальний коефіцієнт пропускання світла, точка роси, довговічність (стійкість до кліматичних впливів і впливів агресивних середовищ), термостійкість, зміна кольору після ультрафіолетового випромінювання,

теплопровідність, густина, сорбційна вологість, коефіцієнт паропроникності, термін ефективної експлуатації ізоляційних матеріалів, зміна лінійних розмірів при знакозмінних температурних умовах, морозостійкість, водопоглинання, звукоізоляція від повітряного і ударного шуму огорожувальних конструкцій будівель, конструкцій шумозахисних екранів, звукопоглинальні характеристики матеріалів і конструкцій, шумові характеристики машин, технологічного і інженерного обладнання тощо.

На даний час актуальними задачами і



дослідженнями в галузі будівельної фізики і енергоефективності залишаються:

- подальше розроблення і удосконалення нормативної бази з проблем енергоефективності і будівельної акустики з метою гармонізації національних законодавчих та нормативних документів з вимогами директив та стандартів ЄС, впровадження європейської нормативно-правової бази в українську;
- розроблення наукових основ державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель і споруд;
- розроблення технічних рішень, направлених на підвищення енергетичних та акустичних характеристик конструкцій, будівель і споруд. Оцінювання теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій, їх водо- і повітропроникності з розробленням рекомендацій щодо поліпшення технічних рішень;
- розроблення системи сертифікації будівель за показниками теплового комфорту, енергозбереження, акустичного комфорту і захисту від шуму, природного та штучного освітлення, екології з урахуванням світового досвіду зеленого будівництва;
- розроблення системи сертифікації та маркування будівельної продукції за характеристиками енергоефективності з метою забезпечення диференціації продукції провідних виробників з подальшим її впровадженням в будівництво;
- розроблення конструктивних рішень внутрішніх і зовнішніх огорожувальних конструкцій житлових та громадських будівель із заданою звукоізоляцією від повітряного і ударного шуму; розроблення конструктивних рішень щодо підвищення звукоізоляції огорожувальних конструкцій в існуючих будівлях до нормативних величин; розроблення ефективних звукопоглинальних конструкцій;
- оптимізація конструктивних рішень теплоізоляційних оболонок будівель на підставі моделювання температурних режимів конструктивних систем утеплення. Атестація і сертифікація будівельних матеріалів, виробів, конструкцій за їх теплотехнічними показниками тощо.

Науково-дослідний «Експериментальний комплекс з досліджень в галузі будівельної фізики» повністю забезпечує увесь спектр послуг, наукових розробок і експериментальних досліджень у будівництві в сфері будівельної фізики і енергоефективності з метою забезпечення надійного, екологічно безпечного і комфортного середовища проживання і перебування людей в будівлях і на територіях при ефективному використанні ресурсів і енергозбереження. Є провідним науковим і експертним центром в Україні в галузі будівельної

фізики, довговічності будівельної продукції та захисту довкілля від впливу шкідливих факторів зовнішнього середовища.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Фаренюк Г.Г. Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій. Київ: Гама-Принт, 2009. 216 с.
2. ДБН В.1.2-10:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Захист від шуму та вібрації. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 20 с.
3. ДБН В.1.2-11:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 21 с.
4. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 27 с.
5. ДБН В.2.6-33:2018. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018. 25 с.
6. ДБН В.1.1-31:2013. Захист територій, будинків і споруд від шуму. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 54 с.
7. ДСТУ Б В.2.7-184:2009. Будівельні матеріали. Матеріали звукоізоляційні і звукопоглинальні. Методи випробувань. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.
8. ДСТУ Б В.2.6-85:2009. Конструкції будинків і споруд. Звукоізоляція огорожувальних конструкцій. Методи оцінювання. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 30 с.
9. ДСТУ Б В.2.6-86:2009. Конструкції будинків і споруд. Звукоізоляція огорожувальних конструкцій. Методи вимірювання. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 46 с.
10. ДСТУ Б В.2.7-182:2009. Будівельні матеріали. Методи визначення терміну ефективної експлуатації та теплопровідності будівельних ізоляційних матеріалів у розрахункових та стандартних умовах. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010.
11. ДСТУ Б В.2.7-183:2009. Будівельні матеріали. Матеріали та вироби будівельні і звукопоглинальні і звукоізоляційні. Класифікація й загальні технічні умов. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.
12. ДСТУ Б В.2.7-184:2009. Будівельні матеріали. Матеріали звукоізоляційні і звукопоглинальні.



- Методи випробувань. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.
13. ДСТУ Б В.2.6-100:2010. Конструкції будинків і споруд. Методи визначення теплостійкості огорожувальних конструкцій. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 42 с.
  14. ДСТУ Б В.2.6-101:2010. Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 90 с.
  15. ДСТУ Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 127 с.
  16. ДСТУ-Н Б В.1.1-32:2013. Настанова з проектування захисту від шуму в приміщеннях засобами звукопоглинання та екранування. Київ: Мінрегіон України, 2014.
  17. ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013. Настанова з розрахунку та проектування захисту від шуму сельбищних територій. Київ: Мінрегіон України, 2014. 46 с.
  18. ДСТУ-Н Б В.1.1-34:2013. Настанова з розрахунку та проектування звукоізоляції огорожувальних конструкцій житлових і громадських будинків. Київ: Мінрегіон України, 2014. 92 с.
  19. ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013. Настанова з проведення розрахунку рівнів шуму в приміщеннях і на територіях. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 58 с.
  20. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022.
  21. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 63 с.
  22. Фаренюк Г.Г., Фаренюк Є.Г. Методичні основи нового покоління будівельних норм з енергоефективності будівель. Наука та будівництво. 2022. №3-4 (33-34). С. 16-25.
  23. Farenjuk G.G., Farenjuk Y.G. Definition of reference building in development of requirements to energy efficiency indicators. Science & Construction. 2021. №2. P.3-10.
  24. Farenjuk G. The determination of the thermal reliability criterion for building envelope structures. Technical Journal. 2019. Vol. 13, No. 2. P. 129-133.
  25. ДСТУ-Н Б В.2.6-219:2016. Настанова з енергетичного маркування будівельних теплоізоляційних матеріалів та виробів. Київ: Мінрегіон України, 2017.
  26. ДСТУ ISO 354:2007. Акустика. Вимірювання звукопоглинання у ревербераційній камері (ISO 354:2003, IDT). Київ: Держспоживстандарт України, 2011.
  27. ДСТУ EN ISO 3741:2014. Шум машин. Визначення рівнів звукової потужності по звуковому тиску. Точні методи для ревербераційних камер. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

#### REFERENCES

1. Farenjuk, G. (2009). Basics of assurance of energy efficiency of buildings and thermal reliability of envelope. Kyiv: Gama-Print.
2. DBN V.1.2-10:2021. (2022). Basic Requirements for Buildings and Structures. Noise and Vibration Protection. Kyiv, Ukraine: Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine.
3. DBN V.1.2-11:2021.(2022).Basic Requirements for Buildings and Structures. Energy Conservation and Energy Efficiency. Kyiv, Ukraine: Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine.
4. DBN V.2.6-31:2021. (2022). Thermal Insulation and Energy Efficiency of Buildings. Kyiv: Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine.
5. DBN V.2.6-33:2018. (2018). External Wall Constructions with Facade Thermal Insulation. Design Requirements. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine.
6. DBN V.1.1-31:2013. (2014). Territories, Buildings, and Structures Protection against Noise. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine.
7. DSTU B V.2.7-184:2009. (2010). Building Materials. Sound Insulating and Sound Absorbent Materials. Methods for Test. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine.
8. DSTU B V.2.6-85:2009. (2010). Building Structures.Sound Insulation of Enclosing Structures. Methods for Evaluation. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine.
9. DSTU B V.2.6-86:2009. (2010). Building Structures.Sound Insulation of Enclosing Structures. Methods for Measurement. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine.
10. DSTU B V.2.7-182:2009. (2010). Building Materials. Methods of Determination the Effective Operation Terms and Heat Conductivity of Building Insulation Materials under Design and





- Standard Conditions. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine.
11. DSTU B V.2.7-183:2009. (2010). Building Materials. Constructive Sound Absorbing and Insulating Materials and Products. Classification and General Technical Requirements. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine.
  12. DSTU B V.2.7-184:2009. (2010). Building Materials. Sound Insulating and Sound Absorbent Materials. Methods for Test. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine.
  13. DSTU B V.2.6-100:2010. (2010). Building Structures. Methods of Determination the Fire Resistance of Enclosing Structures. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine.
  14. DSTU B V.2.6-101:2010. (2010). Building Structures. Method of Determination the Thermal Resistance of Enclosing Structures. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine.
  15. DSTU B V.1.1-27:2010. (2011). Protection against Hazardous Geological Processes, Harmful Operational Effects, and Fire. Construction Climatology. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine.
  16. DSTU-N B V.1.1-32:2013. (2014). Guidelines for Designing Noise Protection in Rooms Using Sound Absorption and Shielding Measures. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.
  17. DSTU-N B V.1.1-33:2013. (2014). Guidelines for Calculating and Designing Noise Protection for Residential Areas. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.
  18. DSTU-N B V.1.1-34:2013. (2014). Guidelines for Calculating and Designing Sound Insulation of Enclosing Structures in Residential and Public Buildings. Kiev: Ministry of Regional Development of Ukraine.
  19. DSTU-N B V.1.1-35:2013. (2014). Guidelines for Conducting Noise Level Calculations in Rooms and on Territories. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine.
  20. DSTU 9190:2022. (2022). Energy Performance of Buildings. Method for Calculating Energy Use for Space Heating, Cooling, Ventilation, Lighting, and Domestic Hot Water. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNC".
  21. DSTU 9191:2022. (2022). Thermal Insulation of Buildings. Method for Choosing Thermal Insulation Materials for Insulation of Buildings. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNC".
  22. Farenjuk, G. G., & Farenjuk, Y. G. (2022). Methodological Foundations of the New Generation of Building Standards for Building Energy Efficiency. *Science & Construction*, 3-4(33-34), 16-25.
  23. Farenjuk G.G., Farenjuk Y.G. Definition of reference building in development of requirements to energy efficiency indicators. *Science & Construction*, 2, 3-10.
  24. Farenjuk, G. (2019). The determination of the thermal reliability criterion for building envelope structures. *Technical Journal*, 13(2), 129-133.
  25. DSTU-N B V.2.6-219:2016. (2017). Guidelines for Energy Labeling of Building Thermal Insulation Materials and Products. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.
  26. DSTU ISO 354:2007. (2011). Acoustics. Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room. Kyiv: State Consumer Standard of Ukraine.
  27. DSTU EN ISO 3741:2014. (2016). Noise of Machines. Determination of Sound Power Levels by the Pressure Reciprocity Method in Reverberation Rooms. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNC".

Стаття надійшла до редакції 31.07.2023



Doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-2>

UDC 624.07



**Jarosław SZULC**  
PhD, Instytut Techniki  
Budowlanej (ITB)  
Warsaw, Poland  
e-mail: j.szulc@itb.pl,  
tel.: +48 22 57 96 493,  
ORCID: 0000-0002-0447-3927



**Jan SIECZKOWSKI**  
M.Sc., Instytut Techniki  
Budowlanej (ITB)  
Warsaw, Poland  
e-mail: j.sieczkowski@itb.pl,  
ORCID: 0000-0002-3191-8602

## PROTECTION OF LARGE PANEL BUILDINGS AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE

### ABSTRACT

With the large panel buildings being widely used, effective protection of buildings against the destructive effects of extraordinary loads becomes an important issue. Therefore, the article delves into the history of developing standards that regulate design basics of buildings made of large-scale elements.

The article deals with characteristic properties such as spatial stiffness by using a system of rigid transverse and longitudinal walls. The author emphasizes that a characteristic feature of the design of large panel buildings is the presence of monolithic joints between prefabricated elements in the ceiling and wall slabs. The article identifies the components that play an important role in ensuring sufficient reliability of large panel system buildings.

The article stipulates methods of accounting for accidental loads in designing large panel system buildings and covers application methods. The article covers the guidelines for protecting large panel buildings against progressive collapse.

The authors outline that the local destruction of a load-bearing wall in the zone adjacent to the outer edge is extremely dangerous due to a progressive collapse, and that is why it is important to take into account progressive collapse in structural design.

The article contains basic design recommendations

for protecting large-panel buildings against the effects of extraordinary loads.

In conclusion, the authors opine that the methodology of protecting large panel buildings against the effects of a progressive collapse may be used for assessing the state of a structure damaged due to warfare.

In the case of war damage to large-panel buildings occurring in Ukraine, due to the extent of the destruction, the article recommends developing procedures aimed at reliability assessment with partial use of the methods described in the article. On top of that, the catalog of strengthening solutions for each large panel system should be developed and available in case if reconstruction is needed.

**KEYWORDS:** large panel buildings, spatial stiffness, monolithic joints, reliability, accidental loads, progressive collapse

### ЗАХИСТ ВЕЛИКОПАНЕЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ ВІД ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ

### АНОТАЦІЯ

У зв'язку з широким використанням великопанельних будівель ефективний захист будівель від руйнівного впливу екстремальних наванта-



жень стає важливим питанням. Тому в статті розглядається історія розробки стандартів, які регулюватимуть принципи проектування будівель з великих елементів.

У статті розглядаються такі характерні властивості, як просторова жорсткість за допомогою використання системи жорстких поперечних і поздовжніх стінок. Автор підкреслює, що характерною особливістю проектування великопанельних будівель є наявність монолітних швів між збірними елементами в плитах стелі і стін. У статті вказані компоненти, які відіграють важливу роль для забезпечення достатньої надійності великопанельних будівель при їхньому проектуванні.

У статті розглядаються методи обліку навантажень при виникненні аварії під час проектування великопанельних будівель і сфера застосування цих методів. У статті конкретизовані та проаналізовані настанови щодо захисту великопанельних будівель від прогресуючого обвалення.

Через локальне руйнування несучої стіни в зоні, прилеглої до зовнішнього краю, що є надзвичайно небезпечно через можливість прогресуючого обвалення, автор наполягає на тому, що локальному руйнуванню необхідно приділяти особливу увагу при проектуванні будівлі. У статті містяться основні проєктні рекомендації щодо захисту великопанельних будівель від впливу екстремальних навантажень.

У висновках автор висловлює думку, що методологія захисту великопанельних будівель від наслідків прогресуючого обвалення може використовуватися для оцінки технічного стану об'єкта, пошкодженого в результаті бойових дій.

У випадку пошкодження великопанельних будівель внаслідок війни в Україні, в залежності від масштабу руйнувань, рекомендується розробити послідовні принципи оцінки надійності об'єктів з частковим використанням методів, описаних у статті, а також розробити каталог рішень щодо посилення великопанельної системи будівлі у випадку можливості проведення реконструкції.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** великопанельні будівлі, просторова жорсткість, монолітні шви, надійність, навантаження при аварії, прогресуюче обвалення

## INTRODUCTION

During the use of buildings, in special situations, in addition to the standard permanent and variable loads included in the calculations, loads of accidental character may also occur. In most design situations, it is impossible to clearly determine both the type, size and frequency of occurrence of extraordinary loads. Therefore, effective protection of buildings against their destructive effects becomes an important issue. Despite difficulties, it is necessary to ensure that a building structure meets the minimum level of safety by adopting an appropriate combination of influencing factors during static-strength calculations

and thus already taking the influence of additional accidental loads into account. Furthermore, satisfying design requirements developed on the basis of the results of experimental research and theoretical analysis is mandatory.

The issue of protecting structures from the effects of special loads applies to all types of structures. However, due to the limited degree of monolithicity and the fact that the load-bearing structures include simply supported systems, prefabricated structures are characterized by their lower ability to redistribute internal forces and are therefore more susceptible to a progressive collapse in typical monolithic structures.

## THE BASIC PRINCIPLES OF DESIGNING THE STRUCTURE OF LARGE PANEL BUILDINGS

### Standard setting regulations

Constructing buildings from large scale prefabricated elements was a new technology in Poland in 1960s, which is why textbook studies on designing such structures [1], [2] were considerably ahead of standard setting provisions [3].

During the early stages of the evolution of large panel buildings, two international organisations were working vigorously to develop international guidelines regarding the principles of designing buildings made of large scale elements [4]: CEB-FIP (European Committee for Concrete - International Federation for Prestressing) and CIB (International Council for Research and Innovation in Building and Construction), especially in the CIB W23 "Wall Structures" sub-committee; representatives of Poland actively participated in these efforts as well.

The first national standardisation deliverable regarding the designing of large panel system buildings was industry standard BN-74/8812-01 [3], approved in 1974.

In order to make the structure adequately resistant to local damage and limit the scope of potential damage, the PN-B-03264:1999 standard for designing concrete structures [5], harmonized with PN-EN 1992-1-1:2008 [6], emphasized the need to ensure that buildings are sufficiently cohesive by systematically connecting ceilings to walls and columns. The rules of shaping the reinforcements of specific components and their joints specified in these documents were generally consistent with the requirements of standard [3].

In the period of designing large-panel construction systems, the existing standards and guidelines allowed most of the technical problems that occurred during the development of these systems to be solved. In the cases that involved the use of entirely new solutions, which had not been tested practically and were not covered by existing standards or instructions, many experimental studies were carried out (Fig. 1), primarily in the Building Research Institute (Instytut Techniki Budowlanej). They generally concerned structural strength issues, but they also included the



**Figure 1** - Studying the horizontal joint of the Wk-70 system (A. Pogorzelski, 1982)

verification and evaluation of insulation and acoustic properties of building envelopes. Additional analyses were focused on the issues of production, transport and storage of prefabricated elements [7].

### **Characteristic properties**

The basic rule of designing large panel system buildings was to give them adequate spatial stiffness by using a system of rigid transverse and longitudinal walls which pass through vertically through the entire building and, usually, through its monolithic, underground part.

The walls constituted vertical partitions whose main task was to take over loads (mainly vertical ones) and transmit forces to the foundations of the building. In addition, due to their significant resistance to plane strain, the external walls prevented the twisting of the building's spatial structure in the course of bending. Therefore, the design assumptions posit that under the influence of wind, the cross sections of the structure move in parallel.

Transverse and longitudinal walls, which were the main components of the building's spatial structure, were treated as supports fixed in the monolithic, underground part of the building or in the ground.

Ceilings in large panel system buildings were treated as rigid horizontal partitions in the calculations (when taking over horizontal forces they act as beams walls bent in their plane), which was equivalent to the assumption that the horizontal contour of the cross section of the building structure would not change in the case of its strain.

A characteristic feature of the design of large panel system buildings is the presence of monolithic joints between prefabricated elements in the ceiling and wall slabs. These joints are locations where the strength properties of the slab changes, places in which its strains caused by internal forces induced by external influence on the structure, concrete shrinkage, temperature changes or incorrect filling of the joints are concentrated. The internal forces, both

perpendicular (to the plane of the joint) and tensile, as well as parallel and shearing may cause cracks to appear in the joint.

Apart from the intensity of the influencing factors, as a result of which internal forces appear within the structure, the shape and width of such cracks may also affect the effectiveness of the reinforcement which ensures that the building retains spatial cohesion, i.e. the peripheral reinforcement (tie beams) which surrounds the structural walls at the ceiling level and the supporting reinforcement of the ceilings anchored in these tie beams or spreading from one ceiling span to another. The tie beams and the support reinforcement connect prefabricated panels into ceiling and wall slabs, thus ensuring that the building has adequate spatial stiffness. These components also play an important role in the creation of the secondary load bearing structure above the potentially damaged part of the building and in compensating for the strains in the interface of walls bearing different loads, as well as in taking over the tensile forces which appear in the wall as a result of an uneven settlement of the building.

The adoption of such assumptions when designing large panel buildings was intended to ensure their sufficient reliability.

### **Accidental loads**

When designing large panel residential and public buildings, the possibility of extraordinary loads caused by the following factors were taken into account:

- gas explosion in enclosed rooms,
- an impact caused by a wheeled transport vehicle if the building is located near an active traffic lane.

Until the development of the standard [3], accidental loads were included in the design on the basis of CEB/FIP recommendations [4]. Some of the requirements of these documents can be applied directly to extraordinary events caused by other factors, e.g., warfare.

## **METHODS OF ACCOUNTING FOR ACCIDENTAL LOADS IN THE DESIGN OF LARGE PANEL SYSTEM BUILDINGS**

### **Method I**

The first method consists in estimating the most approximate magnitude of the extraordinary load and including it in the design of a building structure. In such approach, cracks with significant gap widths and permanent deformations in close proximity to the occurrence of extraordinary loads, are allowed. However, the structure should remain unchanged and capable of transferring loads safely, as well as allow the evacuation of residents and rescue operations.

### **Method II**

In the second method, the possibility of local destruction of the structure is permissible. The



magnitude of the extraordinary load, as in the first method, is not determined but the extent of local destruction is estimated. The essence of the protection is to endow the structure with a capability to shape a secondary load bearing structure around the site of local destruction, capable of transferring loads in a changed static diagram. The secondary system may be composed of, in addition to the supporting elements of the structure located outside the place of local destruction, elements which are non-structural in the primary system (e.g. concrete curtain walls), provided that the load bearing capacity of these elements and the method of connection with the rest of the structure ensures their appropriate contribution in the operation of the secondary system. In the zone of the secondary structure, significant cracks and displacements of structural elements are allowed in relation to each other, provided that the safety of residents is ensured.

#### **Scope of application of the methods**

Method I, consisting in allowing for extraordinary loads in the design, leads to increasing cross-sections of structural elements and their reinforcement. For this reason, its application is recommended for protecting structures with limited capabilities of creating a secondary load bearing structure in the event of local destruction. This type includes skeleton frame structures. According to observations, an explosion in a building with a skeleton frame structure usually destroys the infill walls and, sometimes, the ceilings, while the columns have a chance to resist the force of the explosion. On the other hand, designing a skeleton frame structure that would be resistant to a progressing collapse, when one of the columns is destroyed, is possible only to a limited extent.

Wall structure buildings (large panel system buildings) should be secured using method II. In special cases of the construction system of these buildings, certain parts of the structure or the whole require being secured in accordance with method I.

Combinations of both methods are possible, i.e., transferring extraordinary loads up to a specific magnitude by the primary structure and creating a secondary structure under higher load conditions.

In both methods of securing a building against the effects of extraordinary loads, due to the lower probability of the occurrence of these loads, the safety of the structure should be verified for the typical strength properties of materials and the magnitude of loads.

In the analysis of the structure, all strength reserves can be taken into account, including the full plasticity of the reinforcement, consequences of large rotations and displacements.

In the case of method I, the extraordinary load is added to the normal load, and in the case of method II, the normal load is only the load impacting the structure, but depending on the secondary

structure in question, this load can be increased by an appropriate dynamic coefficient.

In the calculations, the permanent load, a long term variable load and 1/3 of the short-term variable load are adopted as the normal load, while the wind load is omitted.

### **GUIDELINES FOR PROTECTING LARGE PANEL BUILDINGS AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE**

#### **Protecting buildings according to Method I**

Protecting buildings with the method I involves designing a structure capable of transferring extraordinary loads in addition to ordinary loads (permanent loads and long and short-term variable loads). The dynamic load caused by a gas explosion in a closed room can be replaced by a static force acting evenly on the walls and ceiling slabs. The value of this force depends on the strength and surface of the weakest partition or part of the partition in the room (window, door), which at the time of explosion is the first to be destroyed and acts as a valve, reducing the gas pressure on the remaining partitions and on the room where the explosion took place.

The magnitude of the horizontal forces caused by a vehicle impact is determined by the standard for the loading of structures with vehicles [6], where these forces range from 40 to 500 kN. For the calculations, it is assumed that the forces are applied at a height of 1.2 m above the level of the surrounding area.

#### **Protecting buildings according to Method II**

Local destruction of the structure is defined as the destruction of two walls conjoined in the corner of the room where the explosion occurred and when one of these walls is the outer wall [4]. Two cases of the local destruction zone range can be distinguished depending on the resistance of the wall to a uniformly distributed load (blast) less or more than 10 kN/m<sup>2</sup>.

In the case of walls which can withstand a blast below 10 kN/m<sup>2</sup>, the length of the destroyed section ( $l_w$ ) is equal to the distance between the vertical stiffeners of the wall or between the stiffener and the free edge. However, in the case of walls which can resist a larger blasts, the length of section  $l_w$  can be assumed to be 3.6 m (for end walls or 1.8 m (for internal walls in cases where there is no weakness in the section of the wall adjacent to the estimated destruction zone in the form of a vertical joint, the edge of a door or window opening).

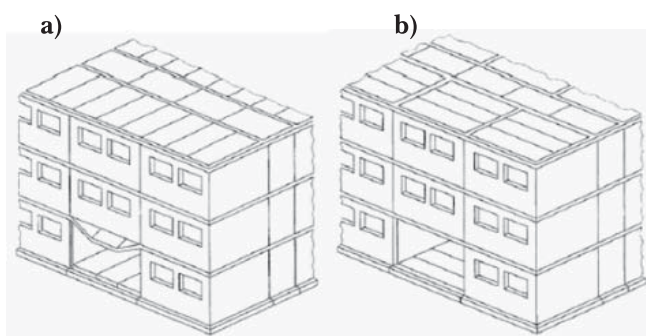
The secondary load bearing structure, located over a part of the locally damaged building, is shaped in accordance with the newly emergent conditions. Depending on the location of the zone of local damage to the load bearing walls, this may be a cantilever, tension rod or beam structure.

One of the most frequent cases of local damage in buildings with walls as the load bearing structure is the destruction of a fragment of internal walls.



Depending on the structural solution, there are two possible situations [8]:

- in the case of insufficient connection between the ceiling, tie beams and the wall the ceiling above the damaged part may fall off or hang from the tie beam acting as a tie rod. This situation is undesirable due to the necessity to transmit tensile forces through the wall above the destruction zone (Fig. 2a),
- in the case of an effective connection, the tie beam remains attached to the wall above it, and the loads above the destruction zone are transferred by the walls and tie beams, which undergo stretching (Fig. 2b).



**Figure 2** - Situations following the destruction of a section of the external wall

- a) a building with a longitudinal load bearing structure (secondary beam structure)
- b) a building with a transverse girder bearing structure

Without the central support (which is a part of internal load bearing walls), the ceiling may form a tie rod structure (Fig. 3b), in which the reinforcement placed along the span of the ceiling and the reinforcement of the tie beam transmit tensile forces together, thus forming a structure that spans in two directions; in addition to a relatively significant cross section of the reinforcement, it must have the correct shape in order to prevent the bars in the collapse zone from breaking off the concrete. When creating a secondary structure, the preferred solution is to connect the floor panels using a loop with threaded reinforcement (Fig. 3c) Stirrups connecting the upper and lower bars further prevent the bars from breaking off.

When the ceiling spans more than 4.0 m, it is assumed that the destruction of the central support causes the ceiling joint above this support to be broken and the ceiling collapses. However, the ceiling joint on an undamaged support should be sufficiently strong and elastic to prevent the ceiling from falling off said support. Loop connections work very well in such conditions (Fig. 3c).

A ceiling falling off a support imparts

a dynamic load on the ceiling below. When the connection between adjacent ceilings or between a ceiling and a load-bearing wall is made on a support, the load-bearing capacity of the ceiling is usually sufficient to take over this load. If such a connection is absent, the shock caused by the fall of the upper slabs may cause the ceiling slab to slide off the support and result in the rapid successive collapse of all the ceilings down to the ground floor (Fig. 3a). Such disasters occurred several times during the installation of staircases when stair flights and platform slabs were not connected with appropriate anchors.

In the event that parts of the load bearing wall adjacent to the edge are destroyed the upper storeys of the wall form a multi storey or single storey cantilever structure (Fig. 4).

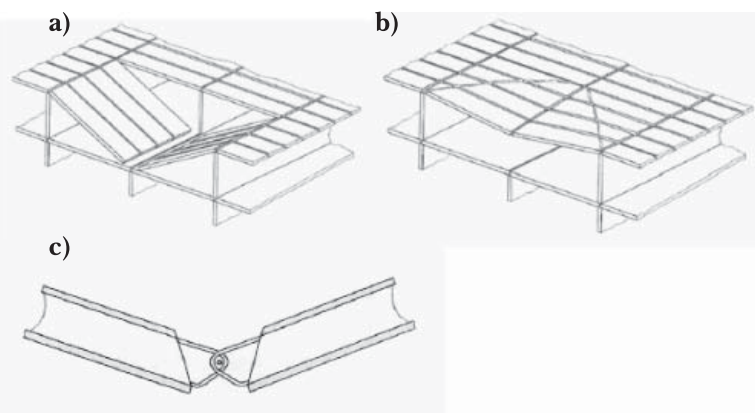
If the ceiling can freely move horizontally over the wall, then the wall works as a flat support in which the tensile force is transmitted only by the reinforcement of the tie beams. Meanwhile, when the joint between a ceiling and a wall can transmit a certain tangential force, a spatial structure is created in which the ceiling takes over a portion of the horizontal force caused by the bending moment.

The curtain (external) wall usually constitutes the load of the cantilever only. However, when this wall is sufficiently rigid and properly connected to the structure, it can work in conjunction with the load bearing wall as an additional component of the spatial cantilever.

In a building whose ceiling rests on its perimeter, the situation is more favourable due to the work of the ceiling without a support, the upper floor wall, as well as the beam broken in the plane.

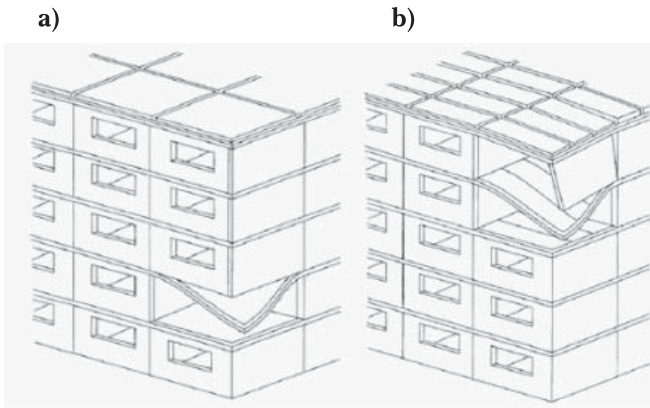
### WORKING CONDITIONS OF THE LOAD BEARING CANTILEVER STRUCTURE

Local destruction of a load bearing wall in the zone adjacent to the outer edge is extremely dangerous due to the possibility of a progressive collapse, which



**Figure 3** - Consequences of damage to an internal load-bearing wall

- a) parts of the ceiling in the destruction zone fall off
- b) forming a secondary load-bearing structure of tie rod type
- c) loop connection in the collapse zone



**Figure 4** - A secondary cantilever structure after the destruction of external walls in the corner of the building  
 a) a multi-storey structure  
 b) a single-storey structure

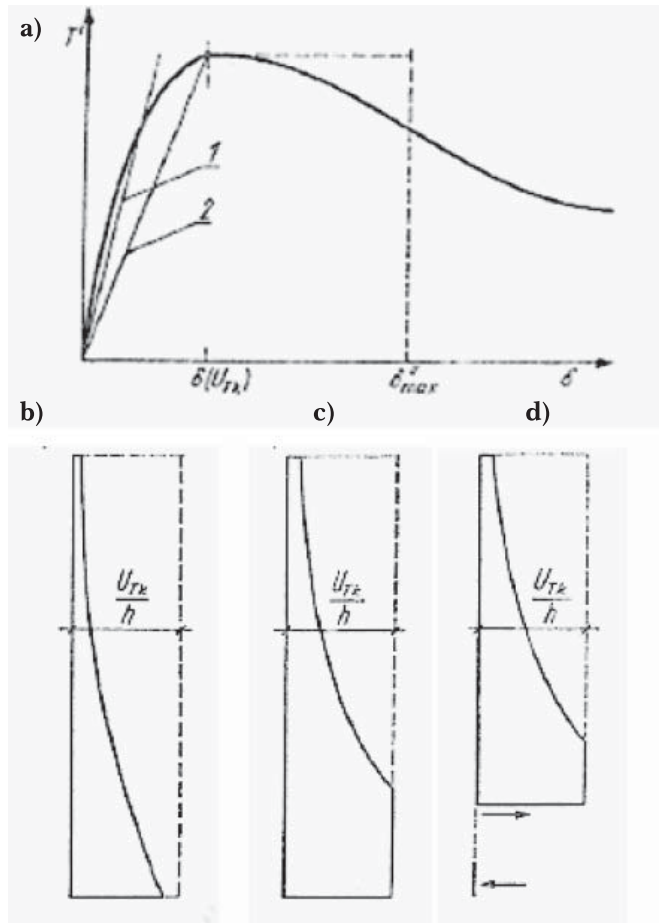
is why particular attention is paid to this scenario when designing a building. The resulting structural protections in horizontal tie beams, appropriate vertical joints and lintel reinforcements applied throughout the building also provide adequate protection in other cases of local damage to a load bearing wall.

The secondary load bearing cantilever (multi-storey) structure is characterized by structural continuity in its vertical joint. In this case, the shear forces occur on the lowest storey, in the immediate vicinity of the destroyed part. The strength of these forces and their distribution along the joint depends on the height of the cantilever and the size of the displacements of the joint's edges  $\delta$ , which accompany shear forces  $T'$  (Fig. 5).

Separating the lower part of a multi-storey cantilever from the rest does not yet equate its destruction. If the part is properly connected to the rest of the storey at the ceiling level (with a tie beam or a tie beam and a ceiling), a new single-storey cantilever structure may be created there. In addition to individual components working together, this structure is accompanied by significant displacements and cracks, and the shear force in the vertical joint is no longer opposed by its cohesion, but by the frictional force in the horizontal force pressure zone caused by the bending moment. From a utility centred perspective, the part of the building in which such a secondary structure was formed is destroyed and requires thorough repair, as opposed to the preservation condition of the multi-storey cantilever, which needs practically no repairs. However, due to the fact that there is no danger to human life, it can be assumed that the limit state of the structure's load bearing capacity has not been exceeded, which means that in a post-emergency situation, the structure will meet safety conditions. The conditions in which the partially damaged structure is used are very complex and related to the

fact that the formation of a secondary load bearing structure is a dynamic phenomenon with unspecified parameters. Therefore, the following findings are used in the calculations, depending on the maximum shear force  $Q_{max} = T_{p,max} \cdot h$  (where  $T_{p,max}$  – maximum unit force shear in the vertical joint,  $h$  – height of the storey) in the vertical joint section equal to the storey height of the multi-storey cantilever, calculated on the assumption that the rigidity of the joint  $C = C_{Uk}$  (rigidity of the joint under stress):

- when the analysis of the operation of the multi-storey cantilever shows that  $Q_{max} \leq U_{Tk}$  – the structure can be considered sufficiently safe,
- when  $U_{Tk} < Q_{max} \leq 2U_{Tk}$  – the possibility of creating a single-storey cantilever should be ensured for the construction, whereby at  $Q_{max} < 1.5 U_{Tk}$  a dynamic coefficient of 1.1 is adopted for calculations, and when  $Q_{max} > 1.5 U_{Tk}$  – 1.2,
- with  $Q_{max} > 2U_{Tk}$  the situation requires structural intervention; the simplest procedure is to



**Figure 5** - Working conditions of a vertical joint in a multi-storey cantilever  
 a)  $T'(\delta)$  dependence  
 b) distribution of stresses  $T'$  in the case when  $\delta < \delta(U_{Tk})$   
 c) distribution of stresses  $T'$  in the case when  $\delta(U_{Tk}) < \delta < \delta_{max}^{II}$   
 d) distribution of stresses  $T'$  in the case when  $\delta > \delta_{max}^{II}$



increase the load bearing capacity of the joint so that  $Q_{max} < 2.0 U_{Tk}$  or look for other solutions.

In principle, the possibility of local damage to the wall should be verified for all storeys of the building. However, usually, the consideration of the consequences of damage to the wall only on the lowest storey and on the third storey from the top is sufficient. In the first case, the largest  $Q_{max}$  will occur due to the greatest height of the cantilever, and in the second case, a single-storey cantilever is the only possible solution. The structures on the remaining storeys should be shaped according to the obtained results.

The multi-storey cantilever is connected to the rest of the building structure by ceilings, therefore, in the analysis of this static diagram, it can be assumed that the cantilever may deform only in the vertical direction by a value of  $\delta$  equal to the displacements of the vertical joint.

The single-storey cantilever in the building can be loaded with one or two ceilings, depending on whether the ceiling above the lower storey has detached from the wall of the upper storey or is still joined.

#### BASIC DESIGN RECOMMENDATIONS

Due to the protection of large-panel buildings against the effects of extraordinary loads, the construction requirements complement the general construction requirements in terms of joining prefabricated elements and maintaining spatial rigidity of buildings specified, among others, in the industry standard [3].

A distinction should be made between the buildings with ceilings anchored on the cantilever (supporting reinforcement connected with the reinforcement of adjacent spans or anchored in a tie beam) and the buildings with simply supported ceilings. In the first case, in the conditions of the secondary load bearing structure, the cooperation of the ceiling with the load bearing wall may be taken into account, and in the second case, this cooperation cannot be taken into account. In both cases, on the other hand, an appropriate connection of the tie beam with the load-bearing wall is required (except when the entire reinforcement of the tie beam is located in the wall slab, the so-called concealed tie beam). It is also very important to connect the rods of the tie beam in a way that ensures full load bearing capacity of the reinforcement.

The safety of the building under extraordinary load conditions may not be checked analytically if the cross-section of the tie beam reinforcement (made of class AIII rebars) is not less than:

- 2.3 cm<sup>2</sup> – in the case of anchored ceilings, with a span of up to 6 m (in all walls or in the case of simply supported ceilings with a span of up to 4.8 m (in internal walls),
- 3.4 cm<sup>2</sup> – in the case of simply supported ceilings

with a span of up to 4.8 m (in the end wall) or in the case of simply supported ceilings with a span of 4.8 to 6.0 m (in the internal walls),

- 4.6 cm<sup>2</sup> - in the case of simply supported ceilings with a span of 4.8 to 6.0 m (in the end wall)

The cooperation of the ceiling with the load bearing walls reduces the longitudinal reinforcement in the tie beam, but does not reduce the shear forces resulting from the connection of the tie beam with the load bearing wall



**Figure 6** - Effects of a gas explosion in a large-panel building (Łódź, Retkinia housing estate)

#### CONCLUSIONS

When creating systematic solutions for large panel buildings, rules were developed to protect these constructions against a progressive collapse, which may occur in extraordinary situations, e.g. as a result of gas explosion [1]÷[4].

The recommended method of verifying the safety status of large panel buildings with a wall load bearing structure is method II (point 3.2) which assumes the possibility of creating secondary load bearing structures in the main structure after the local destruction of the fragments of support elements.

The methodology of protecting large panel buildings against the effects of a progressive collapse





may be the basis for assessing the technical condition of an object after the occurrence of damage related to warfare (Ukraine).

In Poland, extraordinary events occurred occasionally, a spectacular example of which was the gas explosion in December 1983 in the Retkinia housing estate in Łódź (Fig. 6). As a result, the outer (load bearing) end wall at the height of the two lower storeys was damaged, but the building remained stable (after the creation of a multi-storey cantilever secondary structure. As a result of the explosion, 8 people were killed. In the aftermath of the incident, it was decided to place valves shutting off the gas supply outside each building in Poland and mark them accordingly as well as to reduce the pressure in the gas pipelines directly supplying inhabited facilities. After the removal of the debris, the missing part of the building was rebuilt in June 1984.

In the case of war damage to large-panel buildings occurring in Ukraine, due to the extent of destruction, it is recommended that consistent principles be developed for assessing the reliability of facilities (with partial use of the methods described in the article) and, in the case of the possibility of reconstruction that a catalogue of reinforcement solutions dedicated to each large panel system be created.

#### REFERENCES

- 1 Lewicki B.: Budynki z elementów wielkowymiarowych. Arkady, Warszawa 1961
- 2 Lewicki B. i współautorzy: Budynki wznoszone metodami uprzemysłowionymi. Arkady, Warszawa 1979
- 3 BN-74/8812-01 Konstrukcje budynków wielkopłytowych. Projektowanie i obliczenia statyczno-wytrzymałościowe
- 4 Recommendations Internationales pour les Structures en Panneaux – CEB/FIP/UEAtc-Roma Ital. Del Cemento, Roma 1969
- 5 PN-B-03264:1999. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie
- 6 PN-EN 1992-1-1:2008.
- 7 Wierzbicki S.M., Sieczkowski J.: Konstrukcje budynków wielkopłytowych z punktu widzenia zabezpieczenia przed awarią oraz możliwości ich modernizacji. XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane 2013, Szczecin-Międzyzdroje, Materiały konferencyjne (pp. 103-122)
- 8 Starosolski W.: Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych. Część 6. Wydawnictwo PWN, Warszawa 2019

The article was received by Editor's Office on 5.07.2023