

УДК 614.841.343

*С. О. Сідней, к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0002-7664-6620)
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

УТОЧНЕНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ РЕБРИСТИХ ПЛИТ ЗА ВТРАТОЮ ЦІЛІСНОСТІ

Проведені дослідження з оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит при настанні граничного стану втрати цілісності. У EN 1992-1-2 відсутні розрахункові методи визначення межі або класу вогнестійкості залізобетонних плит при настанні граничного стану втрати цілісності (E). Наукові праці, присвячені цьому напрямку досліджень зосереджені лише на двох граничних станах вогнестійкості: несучій спроможності (R) та теплоізоляційній здатності (I). Експериментальні випробування піддаються критиці через труднощі у фіксуванні ознак настання граничного стану втрати цілісності, зокрема через необхідність контролю необігрівної поверхні ребристої плити під час пожежі при дії механічного навантаження. Отже методи проведення розрахунку щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану втрати цілісності немає. При цьому для забезпечення безпечної евакуації людей при виникненні пожежі, запобігання її поширенню або небезпечних чинників, а також проведення ефективної роботи рятувальників необхідно застосування будівельних конструкцій з гарантованими класами вогнестійкості. Представлені результати вирішення теплотехнічної та статичної задач, які стосуються розподілу температури та напружено-деформованого стану досліджуваної ребристої плити. Проведені дослідження щодо вогнестійкості залізобетонних ребристих плит з урахуванням настання граничного стану втрати цілісності надали можливість встановити залежність межі вогнестійкості цих конструкцій за втратою цілісності від рівня прикладеного механічного навантаження. Отриманий графік залежності дозволяє проводити оцінювання залізобетонних ребристих плит за критерієм настання граничного стану втрати цілісності, що надає можливість визначати більш об'єктивно вогнестійкість таких будівельних конструкцій.

Ключові слова: вогнестійкість залізобетонних ребристих плит, моделювання пожежі, наскрізні тріщини, втрата цілісності

1. Вступ

Сучасне будівництво спрямоване на мінімізацію витрат, але при цьому необхідно забезпечувати міцність будівельних конструкцій, що є передумовою безпеки та комфорту для людей під час експлуатації будівель та споруд [1]. Заощадження коштів передбачається за рахунок зменшення витрат на матеріали при виготовленні конструкцій, що зменшує їхню вагу. В результаті досягається економічна доцільність при влаштуванні фундаменту. Одним із видів таких будівельних конструкцій є залізобетонні ребристі плити, які мають меншу вагу порівняно з суцільними плитами тієї ж товщини, що зменшує навантаження на фундамент (Structville). Це дозволяє заощадити на матеріалах як для плит, так і для фундаментів. Завдяки зменшенню об'єму бетону та сталі, необхідних для виготовлення ребристих плит, знижується загальна вартість матеріалів. Конструкція ребристих плит забезпечує високу міцність і жорсткість при меншій вазі, що дозволяє зберігати необхідні технічні характеристики будівель. Ребристі плити легші та зручніші для транспортування і монтажу, що скорочує витрати на будівельні роботи. Зменшення ваги конструкцій веде до зниження витрат на фундамент, що є важливою складовою при будівництві. Таким чином, використання ребристих плит дозволяє досягти значної економії коштів без шкоди для безпеки та комфорту експлуатації будівель і споруд. Застосування таких конструкцій в порівнянні з плоскими плитами або монолітним перекриттям знижує власну вагу перекриття до 40 %, зменшує витрату бетону до 60 % за рахунок видалення з нижньої розтяг-

нутої зони. При цьому жорсткість ребристих плит не поступається монолітним та плоским перекриттям. Це дозволяє влаштувати великі прольоти без використання додаткових опор до 18 метрів, що дає можливість забезпечити більший простір, для влаштування промислових об'єктів. Таким чином, ребристі плити є доцільним та ефективним рішенням у сучасному будівництві завдяки їх економічності, зменшенню ваги конструкцій, покращеній стійкості та можливості перекриття великих прольотів. Це дозволяє створювати більш функціональні та естетично привабливі будівлі з підвищеним комфортом для користувачів.

Тому дослідження, присвячені вивченню поведінки залізобетонних ребристих плит під час впливу стандартного температурного режиму пожежі, а також механічного навантаження, є актуальним. Враховуючи, що ребристі плити забезпечують економічність, знижують вагу конструкцій і дозволяють перекривати великі прольоти без додаткових опор, розуміння їхньої вогнестійкості є ключовим для забезпечення безпеки і надійності сучасних будівель. Це забезпечить створення стійких і довговічних конструкцій, що відповідають вимогам будівництва та експлуатації, з мінімальними витратами.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

З метою недопущення поширення пожежі в об'ємі будівлі, на стадії проектування необхідно використовувати будівельні конструкції з відповідним класом або межею вогнестійкості. Це допоможе унеможливити розповсюдження небезпечних чинників пожежі протягом необхідного часу. Відповідно до табл. 1 [2], для міжповерхових плит перекриття встановлено вимоги щодо граничних станів несучої спроможності (R), цілісності (E) та теплоізолювальної здатності (I), а для плит покриття — лише R та E. Дотримання вимог щодо втрати цілісності обумовлюється обмеженням поширення високих температур, токсичних продуктів згоряння, температури, полум'я, диму, що є критично важливим для безпечної евакуації людей і матеріальних цінностей та роботи аварійно-рятувальних підрозділів. У [3] описаний загальний уточнений розрахунковий підхід для оцінювання вогнестійкості залізобетонних плит перекриття. Однак цей підхід передбачений лише для перевірки відповідності до необхідного класу вогнестійкості лише за втратою несучої спроможності та теплоізолювальної здатності, що не дозволяє об'єктивно визначити клас вогнестійкості конструкції. Отже оцінювання проводиться без врахування часу настання граничного стану втрати цілісності, що унеможливає точне передбачення, коли з'являться критичні тріщини, через які можуть проникати небезпечні чинники пожежі, до або після втрати несучої здатності. Така невизначеність може становити загрозу для життя та здоров'я людей, а також створювати перешкоди для аварійно-рятувальних підрозділів до моменту втрати несучої та теплоізоляційної здатності. Відповідно до [3], передбачається проведення розрахунків вогнестійкості плит за спрощеним (зонним) методом, але лише для плит з товщиною 200 мм. Це обумовлено тим, що у [3] наведено температурні криві для визначення температури в перерізі лише для плит із висотою перерізу 200 мм. Тобто використовувати наведені температурні криві у [3] для оцінювання ребристих плит за цим методом взагалі не передбачається можливим [4]. Слід зауважити, що табличний метод перевірки для плит перекриття та покриття [5] висуває надто суворі вимоги до цих конструкцій. Цей метод не враховує матеріалів, з яких виготовлені конструкції, геометричних характеристик перерізу, зокрема моменту опору, а також не враховує рівень навантаження.

Крім того, цей метод має обмеження щодо перерізу, що робить його неефективним для оцінювання вогнестійкості ребристих плит. Ці обмеження полягають у тому, що для застосування табличного методу мінімальна ширина ребра та товщина самої плити повинні бути не менше 80 мм. Це означає, що конструкції з меншими розмірами неможливо оцінити за вогнестійкістю за цим методом. При цьому визначенню вогнестійкості залізобетонних плит перекриттів присвячено багато наукових робіт, але в них також описані дослідження лише настання двох граничних станів з вогнестійкості несуча спроможність R та теплоізолювальна здатність I .

Так, наприклад, у [6] розглядається розподіл температури в залізобетонній багатопустотній плиті перекриття з урахуванням теплообміну в пустотах плити в умовах пожежі. Однак автор не враховує зниження механічних властивостей бетону та арматури під впливом високих температур, що унеможлиблює точне визначення напружено-деформованого стану конструкції. Це, у свою чергу, є перешкодою для ідентифікації настання граничних станів вогнестійкості, зокрема втрати несучої здатності та цілісності. В роботі [7] автор акцентує увагу на зниженні механічних характеристик арматури та бетону в умовах пожежі. Але при цьому роботі недостатньо уваги приділено аналізу динаміки поширення тріщин та впливу цих процесів на загальну вогнестійкість. У роботі [4] проведено дослідження впливу механічного навантаження на межу вогнестійкості ребристої плити, проте в цій роботі враховувалося лише настання втрати несучої здатності. За результатами проведених розрахунків у [4] встановлено, що межа вогнестійкості при навантаженні конструкції на 50 % від несучої здатності становить 43,9 хв, що не дає можливості забезпечити клас вогнестійкості навіть REI 45. Але при тому настання граничного стану втрати цілісності для цієї конструкції у роботі [4] не проводилось, що не дає можливості підтвердити відповідність межі вогнестійкості 43 хв, опираючись лише на несучу здатність плити.

Згідно до EN 1363-1:2020 та EN 1365-2:2014, ще можна проводити оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій за допомогою експериментальних досліджень [8]. До експериментальних досліджень належать натурні вогневі випробування, що полягають у відтворенні будівлі в повному масштабі та створенні теплового впливу від пожежі на ці конструкції. Цей метод є значно затратним з усіх існуючих і складним у реалізації, оскільки відтворення теплового впливу за кривою стандартного температурного режиму в певному приміщенні будівлі є непростим завданням [8]. Це потребує додаткових досліджень для визначення кількості пальників, отворів для відведення диму, їхньої конфігурації та місця розташування [9]. Експериментальні випробування передбачають проведення досліджень з оцінювання вогнестійкості окремої будівельної конструкції або її фрагменту [9]. Такий метод є менш трудомістким та затратним, проте виготовлення будівельних конструкцій і їхнє транспортування до місця проведення досліджень також є непростим завданням. Це зумовлено тим, що кількість спеціалізованих лабораторій, які мають право на проведення таких робіт, є обмеженою. Проте, такий підхід піддається обґрунтованій критиці з точки зору можливості зафіксувати ознаки настання граничного стану втрати цілісності. Зокрема: спричинення займання ватного тампона, піднесеного до необігрівної поверхні конструкції; забезпечення можливості проникнення щупа відповідних розмірів в утворені тріщини; або виникнення стійкого полуменевого горіння також з боку необігрівної поверхні конструкції.

Отже, необхідне проведення постійного контролю необігрівної поверхні залізобетонної ребристої плити протягом випробувань [10]. Практичний досвід цих випробувань показує, що такий контроль є неможливим, оскільки необігрівна поверхня залізобетонних плит перекриттів покрита вантажами для відтворення умов механічного навантаження при роботі реальної конструкції [11].

Такий стан справ не дозволяє визначати межу вогнестійкості залізобетонних плит за граничним станом втрати цілісності, що ставить під сумнів об'єктивність отриманих результатів. Отже, розробка методу оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану втрати цілісності у ребристих плитах дозволить більш об'єктивно оцінювати такі будівельні конструкції.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи полягає у створенні методу оцінювання з вогнестійкості ребристих плит за настанням граничного стану втрати цілісності. Це дозволить підвищити надійність таких конструкцій під час пожежі, завдяки врахуванню отриманих показників вогнестійкості, що стосуються утворення тріщин, крізь які можливе проникнення небезпечних чинників пожежі.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести теплотехнічний та статичний розрахунки із використанням комп'ютерного моделювання впливу стандартного температурного режиму пожежі та механічного навантаження на залізобетонну ребристу плиту в програмному комплексі ANSYS протягом 60 хв;

- за результатами проведених розрахунків проаналізувати напружено-деформований стан залізобетонної ребристої плити та обґрунтувати метод оцінювання вогнестійкості за втратою цілісності.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є вивчення напружено-деформованого стану залізобетонних ребристих плит в умовах сумісного термосилового впливу.

Предмет дослідження – вогнестійкість залізобетонних ребристих плит при настанні граничного стану втрати цілісності.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що моделювання теплових і механічних впливів дозволить виявити закономірності, які визначають утворення наскрізних тріщин у залізобетонних плитах, що є ключовим параметром для оцінки їхньої вогнестійкості за втратою цілісності.

Методи дослідження включали два основні етапи:

1. Розробка математичної моделі у програмному комплексі ANSYS для дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити в умовах сумісного термосилового впливу протягом 60 хвилин.

2. Аналіз отриманих результатів моделювання для визначення критеріїв напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі з метою обґрунтування методу оцінювання вогнестійкості за критерієм втрати цілісності.

Для вивчення умов настання граничного стану втрати цілісності залізобетонними ребристими плитами було піддано дослідженню окрема залізобетонна ребриста плита [10], зовнішній вигляд якої подана на рис. 1. Дана плита являє собою типовий залізобетонний виріб згідно із проектною документацією, що містить серія 1.465.1. Дана серія містить основні проектні дані для ребристих залізо-

бетонних плит покриттів одноповерхових виробничих та складських будівель. Основними особливостями даної плити є наявність ребер із арматурними стержнями для підсилення панелі між її ребрами.

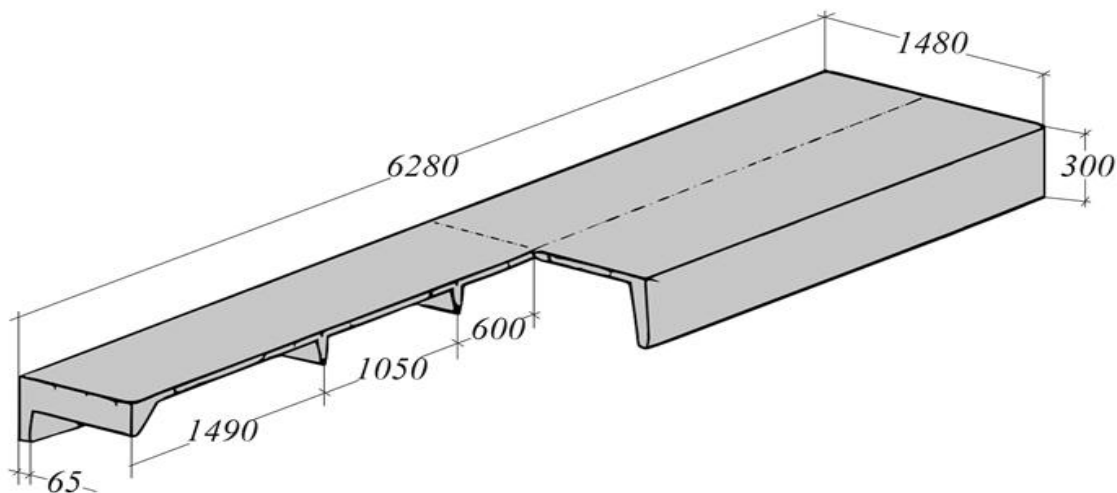


Рис. 1. Зовнішній вигляд досліджуваної залізобетонної ребристої плити [11]

Для розв'язання теплотехнічної задачі моделі ребристої плити, а потім для вирішення сумісного теплового та механічного впливу були прийняті такі основні положення при створенні скінченно-елементної моделі:

1. Для моделювання бетону було прийнято 8-вузловий гексаедричний скінченний елемент, для моделювання сталевих арматурних стержнів 2-вузловий стрижневий скінченний елемент.

2. Всі типи скінченних елементів є фізично нелінійними, їх властивості відповідають моделям нелінійної поведінки матеріалів.

Розміри та кількість скінченних елементів у схемі залізобетонної ребристої плити подані у табл. 1.

Табл. 1. Параметри скінченних елементів моделей зразків для випробування

Частина моделі	Мін. розмір, мм	Макс. розмір, мм	Кількість
Бетонна основа	25	100	4128
Арматура	100	100	1328
Загальна кількість скінченних елементів:			5456

Параметри, які визначають густоту сітки, обрані для забезпечення доброї збіжності обчислювального процесу.

На рис. 2 показаний загальний вигляд скінченно-елементної схеми залізобетонної ребристої плити, що є відповідно дискретизованою розрахунковою областю.

На першому етапі при моделюванні теплового впливу у вигляді температурного навантаження на залізобетонну ребристу плиту розв'язувалася теплотехнічна задача. Для цього застосовується квазілінійне нестационарне диференціальне рівняння теплопровідності. Воно формулюється з постановкою крайової задачі, використовуючи граничні умови III роду. Враховується променистий та конвекційний теплообмін між обігрівними поверхнями та середовищем у приміщенні з пожежею.

Температурний режим впливу на залізобетонну ребристу плиту обчислюється за стандартним температурним режимом пожежі EN 1363-1:2020.

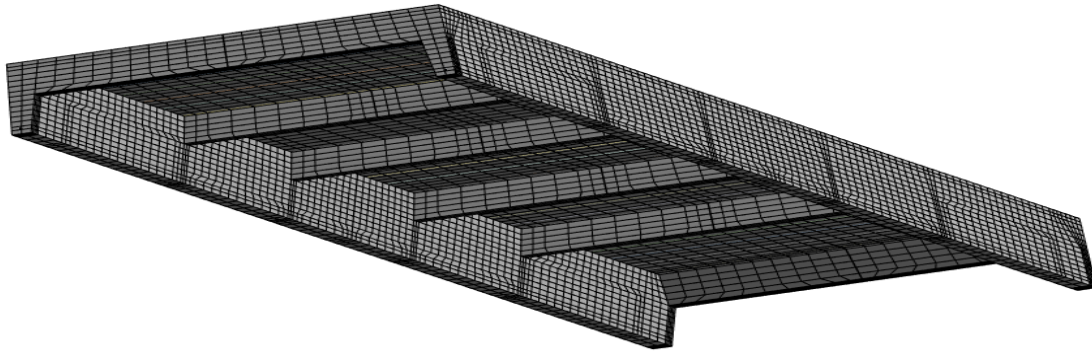


Рис. 2. Скінчено-елементна схема залізобетонної ребристої плити

Теплофізичні характеристики бетону та арматури відповідають температурним залежностям, які рекомендовано EN 1992-1-2.

Параметри граничних умов теплового впливу на залізобетонну ребристу плиту наведені у табл. 2.

Табл. 2. Параметри граничних умов для залізобетонної плити

Параметр	Позн.	Од.вим.	Вел.	Посилання
Обігрівна сторона				
Конвективна складова коефіцієнту теплообміну	α_c	Вт/(м ² °С)	25	EN 1991-1-2 Eurocode 1
Ступінь чорноти	ε	–	0,7	EN 1992-1-2 Eurocode 2
Необігрівна сторона				
Коефіцієнт теплообміну	α	Вт/(м ² °С)	9	EN 1991-1-2 Eurocode 2

Технічні дані бетону наведені в табл. 3 та зазначені основні характеристики для бетону залізобетонної ребристої плити, що було використано під час проведення моделювання.

Табл. 3. Технічні дані щодо залізобетонної ребристої плити

Параметр	Одиниці вимірювання	Величина
Клас міцності бетону	МПа	C 20/25
Густина	кг/м ³	2400
Границя міцності	МПа	20
Розмір крупного заповнювача	м	0,02
Коефіцієнт Пуасона	–	0,3

Технічні дані щодо арматурної сталі наведені в табл. 4. У даній таблиці зазначені основні характеристики для сталі арматурних стержнів залізобетонної ребристої плити.

Для отримання достовірних результатів поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах теплового впливу та механічного навантаження, застосовано відповідні деформативні характеристики бетону та арматури. Моделювання здійснювалося у програмному комплексі ANSYS з використанням діаграми «деформації-напруження». Ці характеристики рекомендовані EN 1992-1-1 та EN 1992-1-2

До верхньої поверхні залізобетонної ребристої плити прикладено механічне навантаження, яке відповідає різним рівням її несучої здатності, зокрема: 30 % – 1,8 кН/м², 50 % – 3 кН/м², 70 % – 4,2 кН/м², 90 % – 5,4 кН/м².

Табл. 4. Технічні дані щодо арматурної сталі ребристої плити

Параметр	Одиниці вимірювання	Величина
Густина	кг/м ³	7850
Модуль пружності	МПа	2·10 ⁵
Коефіцієнт Пуассона	–	0,2
Арматура у поздовжніх ребрах		
Клас міцності	МПа	A400
Границя міцності	МПа	400
Діаметр	мм	16
Арматура у поперечних ребрах		
Клас міцності	МПа	A400
Границя міцності	МПа	400
Діаметр	мм	12
Армування панелі		
Клас міцності	МПа	A400
Границя міцності	МПа	400
Діаметр	мм	8

Згідно із рекомендаціями (IntechOpen-Open Science Open Minds) статичні задачі моделювання напружено-деформованого стану залізобетонних плит при односторонньому впливі на них пожежі зі стандартним температурним режимом вирішувалися з поетапним відтворенням історії навантаження у дві стадії. На першій стадії моделювалося теплове навантаження у вигляді впливу стандартного температурного режиму пожежі. Але, вплив пожежі на залізобетонну ребристу плиту відбувався після прийняття конструкцією механічного навантаження у вигляді рівномірно розподіленого навантаження. На другій стадії вже розв'язувалась статична задача, що передбачає сумісний термосиловий вплив на залізобетонну ребристу плиту.

Використані математичні моделі для проведення розрахунку поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах сумісного термосилового впливу засновані на застосуванні неявного методу інтегрування диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану із використанням методу скінченних елементів.

5. Моделювання напружено-деформованого стану ребристої плити при пожежі та механічному навантаженні

5.1. Результати моделювання впливу температури пожежі та механічного навантаження на плиту

При моделюванні процесу теплопередачі в залізобетонній ребристій плиті при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі отримані температурні дані у внутрішніх шарах. На рис. 3 наведені температурні розподіли у залізобетонній ребристій плиті у різні моменти часу.

На рис. 3 видно, що внутрішні шари плити достатньо сильно прогриваються, особливо у панелі між ребрами.

Для аналізу нагрівання арматурних стержнів було побудовано температурні криві їхнього нагріву залежно від часу. На рис. 4 наведено побудовані криві нагріву арматури у залізобетонній ребристій плиті.

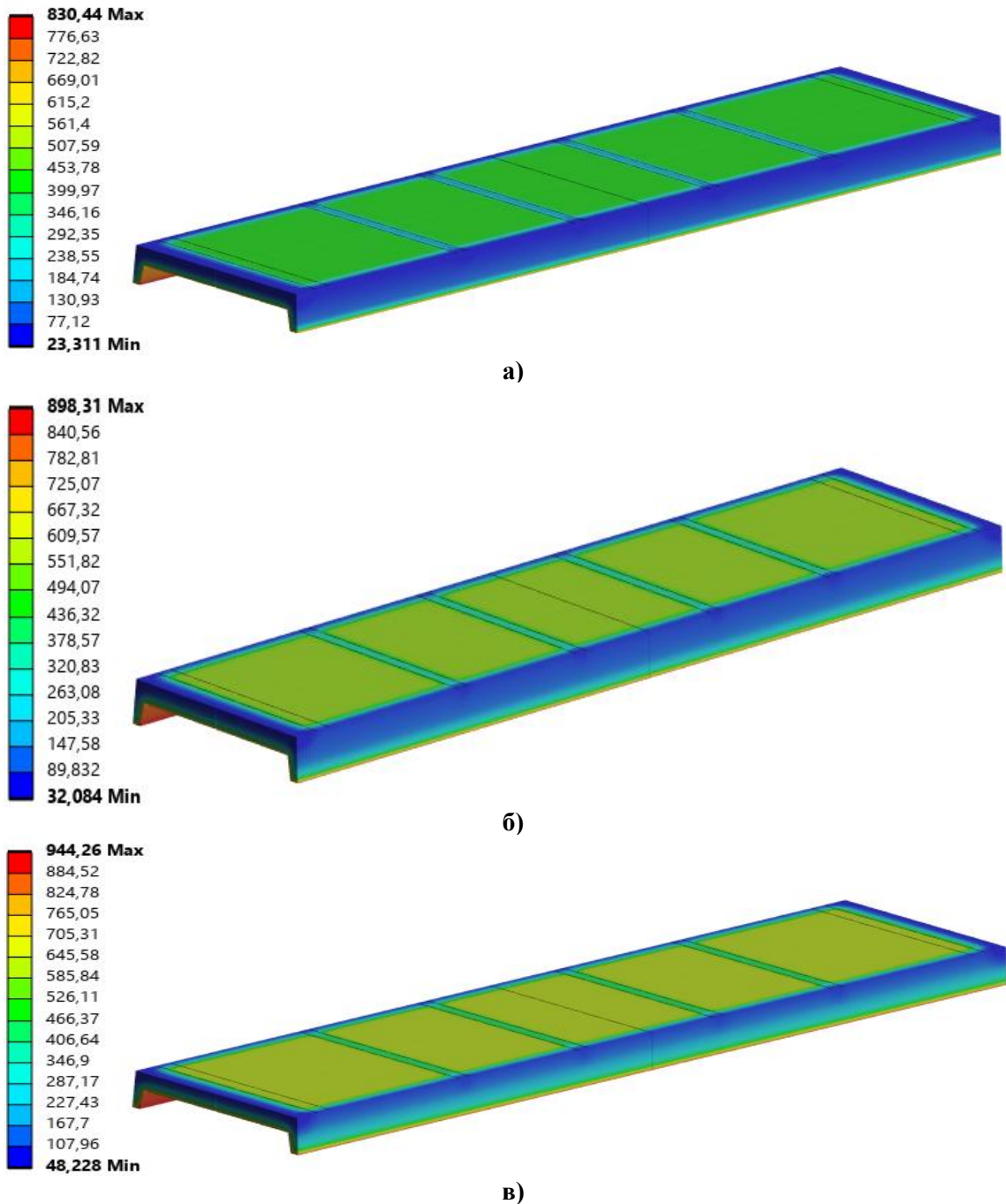


Рис. 3. Температурні розподілення у залізобетонній ребристій плиті у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі (2): а – 30 хв; б – 45 хв; в – 60 хв

Для того щоб проаналізувати настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності був побудований графік середньої температури на необігрівній поверхні досліджуваної залізобетонної плити. На рис. 5 показаний побудований температурний графік прогріву не обігрівної поверхні плити, на якому також показана гранична температура щодо настання стану втрати теплоізолювальної здатності.

Відповідно до EN 1363-1:2020 критерій настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності є перевищення середньої температури на необігрівній поверхні плити на 140 °С або перевищення у будь-якій точці на 180 °С. Таким чином, графік на рис. 5 показує що межа вогнестійкості за настанням втрати теплоізолювальної здатності для даної плити становить 13 хв. Для плит покриттів це є допустимим, оскільки для них втрата теплоізолювальної здатності не нормується.

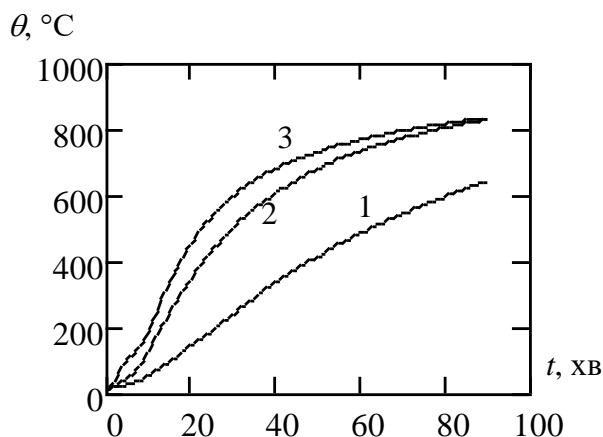


Рис. 4. Температурні криві нагріву арматурних стержнів залізобетонної ребристої плити залежно від часу: 1 – у поздовжньому ребрі; 2 – у поперечному ребрі; 3 – у панелі між ребрами

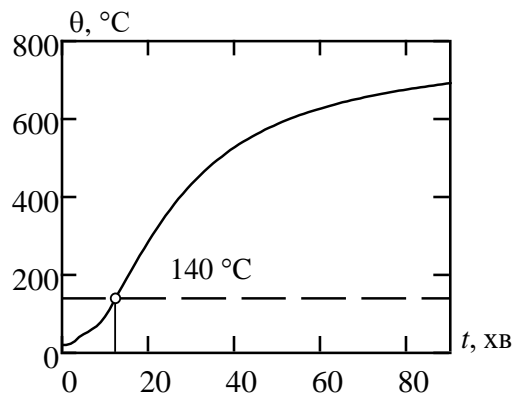


Рис. 5. Графік нагріву не обігрівної сторони досліджуваної залізобетонної ребристої плити

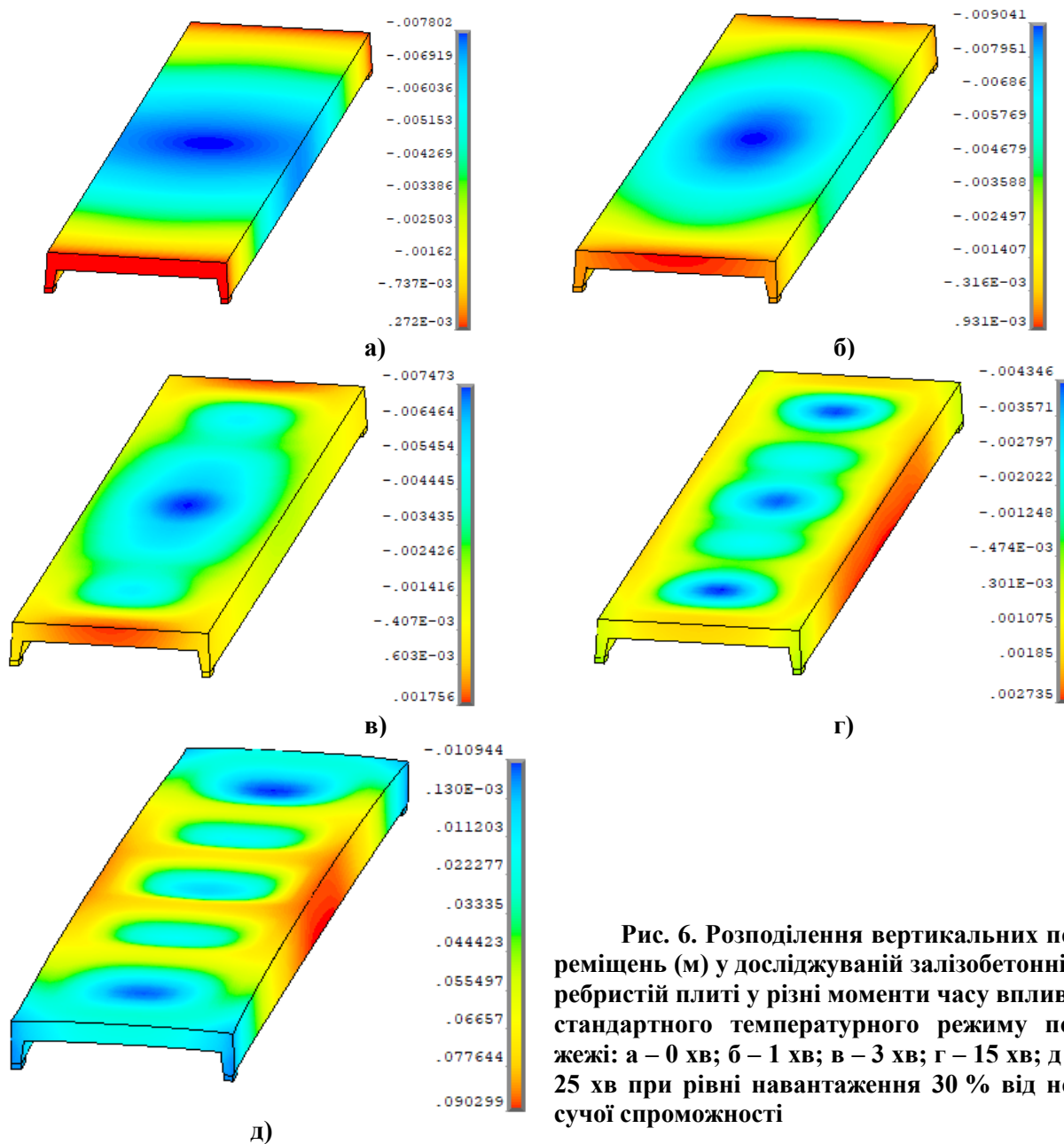


Рис. 6. Розподілення вертикальних переміщень (м) у досліджуваній залізобетонній ребристій плиті у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: а – 0 хв; б – 1 хв; в – 3 хв; г – 15 хв; д – 25 хв при рівні навантаження 30 % від несучої спроможності

Отримані результати розв'язання теплотехнічної задачі, які описані вище, було використано для проведення розрахунку параметрів напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити за прийнятим підходом. Після проведення обчислень був одержаний набір даних про напружено-деформований стан, що має бути проаналізований для виявлення аспектів та закономірностей настання граничного стану втрати цілісності залізобетонної ребристої плити під тепловим впливом пожежі. Так, на рис. 6 наведені розподілення вертикальних переміщень (m) у досліджуваній залізобетонній ребристій плиті у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі при рівні навантаження 30 % від несучої спроможності.

Також одним з обчислених параметрів, що є важливим для оцінювання можливості утворення наскрізних дефектів у залізобетонних ребристих плитах є напруження при яких виникають пластичні деформації у бетоні.

Цей параметр допомагає визначити настання граничного стану втрати цілісності.

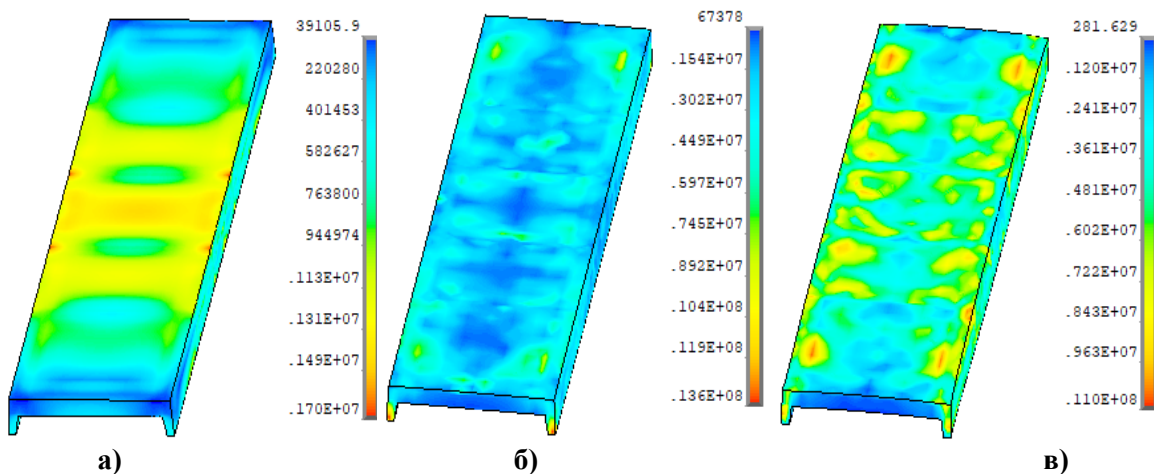


Рис. 7. Розподіли величини напружень (Па) при виникненні еквівалентної пластичної деформації по простору бетонної основи залізобетонної ребристої плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: а – 0 хв; б – 10 хв; в – 25 хв при рівні навантаження 50 % від несучої спроможності

5.2. Аналіз напружено-деформованого стану та оцінка вогнестійкості за втратою цілісності

Отже, для розуміння механізму руйнування внутрішніх шарів плити було побудовано криві вертикальних переміщень залізобетонної ребристої плити для різних умов навантаження. На рис. 8 показані побудовані криві.

За результатами розв'язання статичної задачі встановлено, що нелінійні деформації у комірці між ребрами ребристої плити виникають на 17-й, 18-й, 22-й та 25-й хвилини відповідно, залежно від рівня механічного навантаження. Таким чином, на основі цих даних передбачається настання граничного стану за вогнестійкістю, що характеризується втратою цілісності у комірці між ребрами плити.

На рис. 9 подані дані криві де показано умови настання граничного стану втрати цілісності і метод ідентифікації межі вогнестійкості за даними кривими.

На графіку рис. 9 видно, що для кривої 4, початок нелінійної деформації відбувається приблизно між 17 і 18 хвилинами, де прогин починає різко зростати. Опускання нормалі з цієї точки на вісь часу показує, що межа вогнестійкості для цього випадку буде на цьому проміжку часу. Такий саме принцип застосовується й для визначення для інших рівнів навантажень, що відповідає кривим 1, 2, 3.

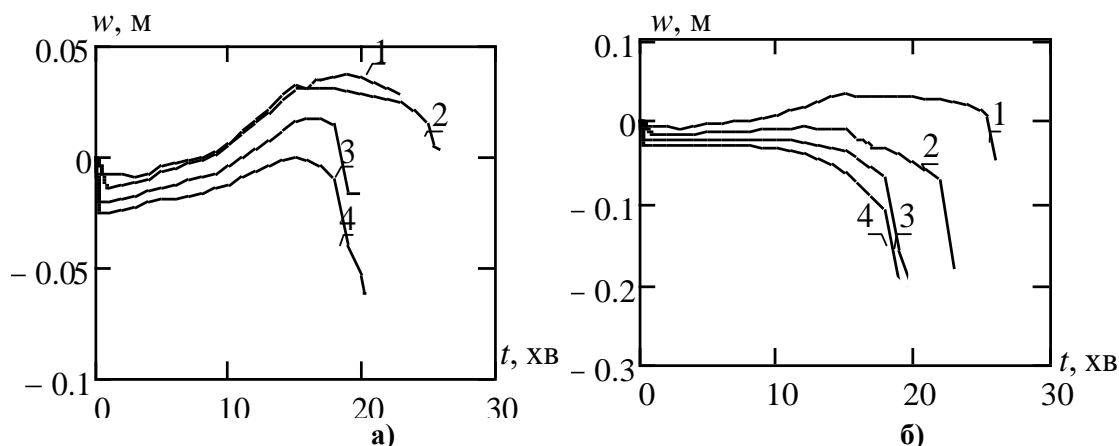


Рис. 8. Графіки максимального прогину залізобетонної ребристої плити під впливом стандартного температурного режиму пожежі для різних значень діючого навантаження (1–30 %, 2–50 %, 3–70 %, 4–90 % від максимального навантаження): а – поздовжнього ребра; б – точки посередині панелі у комірці між ребрами

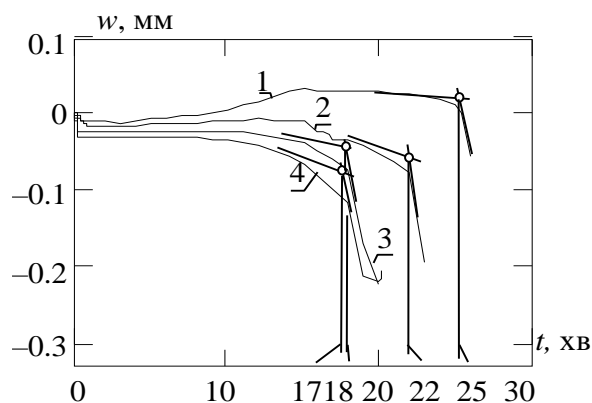


Рис. 9. Графіки максимального прогину точки посередині панелі у комірці між ребрами залізобетонної ребристої плити під впливом стандартного температурного режиму пожежі при різних значеннях діючого навантаження із встановленими межами вогнестійкості: 1 – 30 % від максимального навантаження; 2 – 50 % від максимального навантаження; 3 – 70 % від максимального навантаження; 4 – 90 % від максимального навантаження

Узагальнюючи отримані криві для визначення моменту настання граничного стану втрати цілісності, було обґрунтовано метод оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит на основі цього критерію.

1. Побудова геометричної моделі залізобетонної ребристої плити з врахуванням армування у тому числі у панелі конструкції, з метою відстеження настання нелінійних деформацій у комірках панелі плити між ребрами.

2. Генерування скінченно-елементної сітки, застосовуючи 8-вузлові гексаедричні скінченні елементи для моделювання бетону та 2-вузлові стрижневі скінченні елементи для моделювання сталевих арматур.

3. Теплофізичні та механічні властивості матеріалів конструкції, зокрема: бетону та арматури налаштувати за рекомендаціями [3].

4. Перед початком комп'ютерного моделювання сумісного термосилового впливу необхідно задати граничні умови для відтворення пожежі через конвекційний та радіаційний теплообмін. Також слід визначити рівень прикладання необхідного навантаження та умови закріплення ребристої плити.

5. За результатами проведеного статичного розрахунку слід проаналізувати отримані дані для визначення моменту початку нелінійної деформації у комірці

між ребрами ребристої плити, що є критерієм оцінювання вогнестійкості ребристих плит за втратою цілісності.

6. Обговорення результатів дослідження оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за втратою цілісності

На кривих рис. 4 можна побачити, що найбільше прогрівається арматура у панелі між ребрами, оскільки ця арматура має найменший захисний шар. Трохи повільніше температура у поперечних ребрах і найповільніше прогрівається арматура у поздовжніх ребрах, оскільки має найбільший захисний шар.

Графік на рис. 5 показує що межа вогнестійкості за настанням стану втрати теплоізолювальної здатності для даної плити становить 13 хв. Для плит покриттів це є допустимим, оскільки для них втрата теплоізолювальної здатності не нормується.

Було отримано цікаву картину нарощування вертикальних переміщень плити, що наведена на рис. 6. Як видно на рис. 6, при дії прикладеного силового навантаження (у даному випадку $q_E=1,8$ кН/м тобто 30 % від руйнуючого навантаження) плита має найбільші вертикальні переміщення посередині прольоту. При цьому зона найбільших вертикальних переміщень має круглу форму. Під час моделювання теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі спочатку зона найбільших переміщень має форму еліпса витягнутого вздовж поздовжньої осі плити. На етапах тривалішого теплового впливу найбільші переміщення концентруються у комірках плити, утворених поздовжніми та поперечними ребрами.

Також на рис. 6 можна побачити, що під тепловим впливом пожежі ребриста плита поступово вигинається вгору. Це може бути пояснене температурним розширенням панелі між ребрами.

Наведені розподілення показують, що можливо втрата цілісності відбувається при руйнуванні панелі у комірках між поздовжніми та поперечними ребрами плити.

Аналізуючи розподіли пластичних напружень (рис. 7), можна побачити, що гіпотеза руйнування шару бетону у комірках, які утворюються між поздовжніми та поперечними ребрами залізобетонної ребристої плити, підтверджується, оскільки вони найбільше концентруються біля ребер.

Аналіз графіків на рис. 8 показує, що імовірно руйнування у поздовжньому ребрі плити можливе тільки при прикладенні навантаження більше 70 %, оскільки чіткий загин кривої максимального прогину можна спостерігати саме у цьому випадку. Проте, можна впевнено побачити, що панель у комірці між ребрами має чіткий виражений загин. Це означає, що у всіх випадках руйнування плити відбувається саме внаслідок руйнування панелі між ребрами. Отже, можна припустити, що граничний стан втрати цілісності настає через руйнування панелі між ребрами (в комірках), коли несуча здатність поздовжніх ребер ще зберігається. Це логічно, оскільки захисний шар бетону арматури в цих комірках найменший і складає лише 15 мм.

Враховуючи цю гіпотезу, передбачається можливість використання такого підходу як уточненого методу для оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за граничним станом втрати цілісності. За цим підходом можна використовувати криві типу графіків, поданих на рис. 9.

Таким чином, за результатами проведених досліджень обґрунтований уточнений метод оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану втрати цілісності. Це дозволить визначати вогнестійкість таких конструкцій за граничним станом з вогнестійкості втрати цілісності, що є гарантуванням недопущення утворення тріщин, крізь які можливе проникнення небезпечних чинників пожежі, протягом нормованого часу.

Особливість методу полягає у використанні сучасних інструментів моделювання для комплексного аналізу поведінки залізобетонних ребристих плит в умовах пожежі з ідентифікацією утворення наскрізних тріщин, що є основним критерієм втрати цілісності. Це підвищує точність оцінювання вогнестійкості таких конструкцій та дозволяє адаптувати метод до реальних експлуатаційних умов, що не можливо виконати під час проведення експериментальних досліджень.

При цьому існують певні обмеження під час проведення досліджень. Незважаючи на те, що моделювання проводилося за стандартним температурним режимом пожежі, найбільш точні показники вогнестійкості будівельних конструкцій можна отримати при застосуванні параметричної пожежі, що враховує особливості конфігурації будівлі та пожежне навантаження в приміщеннях, де встановлена конструкція.

Оцінювання вогнестійкості окремої залізобетонної ребристої плити, без урахування її взаємодії з іншими елементами будівлі (колонами, балками, перекриттями тощо), не дає повної картини про поведінку конструкції в умовах пожежі. Будівельні елементи взаємодіють між собою і можуть впливати на загальну стійкість споруди, особливо в разі пожежі.

У перспективі доцільно розглянути не лише окрему конструкцію, а й всю конструктивну систему будівлі в цілому.

Розвиток даного дослідження може полягати у вивченні поведінки всієї будівлі або окремих частин каркаса з урахуванням їхньої взаємодії під час пожежі, включаючи передачу навантажень між елементами (колонами, стінами, балками, плитами). Але при цьому збільшується складність математичних моделей через необхідність врахування численних взаємозв'язків між елементами, що потребує значні обчислювальні потужності для моделювання таких конструктивних систем.

7. Висновки

1. За результатами комп'ютерного моделювання впливу стандартного температурного режиму пожежі та механічного навантаження на залізобетонну ребристу плиту розв'язані теплотехнічна та статична задачі. Втрата теплоізолювальної здатності досліджуваній конструкції становить 13 хв, але для таких конструкцій це є допустимим, оскільки для них втрата теплоізолювальної здатності не нормується. Втрата цілісності плити зафіксована на 17-й, 18-й, 22-й та 25-й хвилинах відповідно до рівня прикладеного навантаження: 30 %, 50 %, 70 % та 90 % від максимального навантаження.

2. За результатами аналізу напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити визначено критерій для ідентифікації граничного стану втрати цілісності, а саме: початок нелінійних деформацій у панелі комірок між поздовжніми та поперечними ребрами. Це дозволило обґрунтувати метод оцінювання вогнестійкості за цим граничним станом.

Література

1. Nilimaa J. Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. *Developments in the Built Environment*. 2023. Vol. 15. P. 100177. doi: 10.1016/j.dibe.2023.100177

2. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги: ДБН В.1.1-7:2016 [Чинний з 01.06.2017]. Київ: ДП «УкрНДЦЗ», 2016. 35 с.

3. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1–2. Загальні положення. *Construction and Civil Engineering*. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-11

ня. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT). Зміна № 1: ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2 [Чинний з 01.07.2014]. Київ: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2013. 131 с.

4. Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Костенко Т., Іщенко І. Дослідження вогнестійкості залізобетонної ребристої плити. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2023. Том 7 № 2. С. 217–226. doi: 10.31731/2524.2636.2023.7.2.217.226

5. Кропива М. О. Удосконалення розрахункового методу оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двутавровими сталевими балками. 2016. Дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. – Державний університет безпеки життєдіяльності, Львів.

6. Ренкас А. А. Забезпечення вогнестійкості залізобетонних багатопустотних плит перекриття із застосуванням листових будівельних матеріалів. Збірник наукових праць Пожежна безпека ЛДУ БЖД. 2019. № 34. С. 72–77. doi: 10.32447/20786662.34.2019.12

7. Ковальов А. І. Удосконалення методу оцінювання вогнезахисної здатності покривів залізобетонних перекриттів. 2012. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02 «Пожежна безпека» / УкрНДІЦЗ. Київ.

8. Perehin A., Nuianzin O., Shnal T., Shchipets S., Myroshnyk O. Improvement of means for assessing fire resistance of fragments of reinforced concrete structures. AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2684(1). 030032. doi: 10.1063/5.0120061

9. Kovalov A., Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk O., Savchenko O. Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. 2018. E3S Web of Conferences. Vol. 60. P. 00003.

10. Sidnei S., Myroshnyk O., Kovalov A., Veselivskyi R., Hryhorenko K., Shnal T., Matsyk I. Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. 2024. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 4 № 7. P. 70–77. doi: 10.15587/1729-4061.2024.310520

11. Dzidic S. Fire Resistance of Reinforced Concrete Slabs. 2023. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.1001046

*S. Sidnei, PhD, Associate Professor of the Department
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

SPECIFIED METHOD OF ASSESSING THE FIRE RESISTANCE OF RIBBED PLATES BY LOSS OF INTEGRITY

An investigation was carried out to evaluate the immersion capacity of reinforced concrete ribbed slabs at the borderline stage of loss of integrity. EN 1992-1-2 has daily diversification methods for determining the limits and class of immersiveness of reinforced concrete slabs at the limiting point of loss of integrity (E). The scientific work is aimed at directly tracking the concentration of the two boundary conditions of the immersive capacity: non-bearing capacity (R) and thermal insulation capacity (I). Experimental testing is subject to criticism due to the difficulties of fixing the sign of the onset of the borderline stage of loss of integrity, despite the need to control the unheated surface of the ribbed slab after an hour. in the case of mechanical engineering. Even the methodology for carrying out destructuring before assessing the absorbency of reinforced-concrete ribbed slabs behind the boundary mill station loses no integrity. In order to ensure the safe evacuation of people in the event of a fire, the protection of more or unsafe officials, as well as the effective work of the military personnel, it is necessary to stagnate the civil servants design with guaranteed immersion resistance classes. The results of the most important thermal and static problems are presented, which are related to the distribution of temperature and the stress-

deformation process of a ribbed plate. Carrying out research into the ingressivity of reinforced-concrete ribbed slabs with the protection of the boundary mill at the loss of integrity has made it possible to establish the deposits between the insulation of these structures at a loss integrity depending on the level of applied mechanical strength. Removing the laying schedule makes it possible to evaluate reinforced concrete ribbed slabs based on the criterion of the moment of the boundary stage of loss of integrity, which makes it possible to evaluate more objectively the immersiveness of such future constructions.

Keywords: dangerous fire factors, fire resistance, ribbed slabs, through cracks, integrity, modeling

References

1. Nilimaa, J. (2023). Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. *Developments in the Built Environment*, 15, 100177. doi: 10.1016/j.dibe.2023.100177
2. State Enterprise "UkrNDICZ". (2016). Fire safety of construction sites. General requirements: DBN B.1.1-7:2016 [Effective from 01.06.2017]. Kyiv: SE "UkrNDICZ".
3. State Enterprise "State Research Institute of Building Structures". (2013). Design of reinforced concrete structures. Part 1-2. General provisions. Calculation of structures for fire resistance (EN 1992-1-2:2004, IDT). Amendment No. 1: DSTU-N B EN 1992-1-2:2012 Eurocode 2 [Effective from 01.07.2014]. Kyiv: SE "State Research Institute of Building Structures".
4. Sidnei, S., Nekora, O., Rudeshko, I., Berezovskyi, A., Kostenko, T., Ishchenko, I. (2023). Research on fire resistance of reinforced concrete ribbed slab. *Emergencies: Prevention and Elimination*, 7(2), 217–226. doi: 10.31731/2524.2636.2023.7.2.217.226
5. Kropyva, M. O. (2016). Improvement of the calculation method for assessing the fire resistance of steel-reinforced concrete slabs with internal I-beam steel girders (PhD dissertation, Lviv State University of Life Safety, Lviv).
6. Renkas, A. A. (2019). Ensuring fire resistance of reinforced concrete hollow-core slabs using sheet building materials. *Collection of Scientific Works Fire Safety of Lviv State University of Life Safety*, 34, 72–77. doi: 10.32447/20786662.34.2019.12
7. Kovalov, A. I. (2012). Improvement of the method for assessing the fire protection capacity of coatings of reinforced concrete floors (Abstract of PhD dissertation, UkrNDICZ, Kyiv).
8. Perehin, A., Nuianzin, O., Shnal, T., Shchipets, S., & Myroshnyk, O. (2023). Improvement of means for assessing fire resistance of fragments of reinforced concrete structures. *AIP Conference Proceedings*, 2684(1), 030032. doi: 10.1063/5.0120061
9. Kovalov, A., Otrosh, Y., Ostroverkh, O., Hrushovinchuk, O., Savchenko, O. (2018). Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. *E3S Web of Conferences*, 60, 00003.
10. Sidnei, S., Myroshnyk, O., Kovalov, A., Veselivskyi, R., Hryhorenko, K., Shnal, T., Matsyk, I. (2024). Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7), 70–77. doi: 10.15587/1729-4061.2024.310520
11. Dzidic, S. (2023). Fire resistance of reinforced concrete slabs. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.1001046

Надійшла до редколегії: 12.10.2024

Прийнята до друку: 16.11.2024