

УДК 693.814.26:621.88

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ З ЛОКАЛІЗАЦІЇ РУЙНУВАНЬ СПРИЧИНЕНИХ ВПЛИВАМИ, НЕ ПЕРЕДБАЧЕНИМИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ

О.А. Тугай¹,

д-р техн. наук, професор

А.А. Козак¹,

канд. техн. наук, доцент

Д.О. Хохлін²,

канд. техн. наук, старший науковий співробітник

М.О. Божинський¹,

аспірант

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ²ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва імені В.С. Балицького», Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.84-96

У роботі запропоновано алгоритмічну послідовність дій побудови інформаційної та математичної прогнозно-розрахункової моделі, яка дозволяє оцінити зміну технічного стану конструктивних елементів після дії позапроектного впливу. Наведений приклад відповідного розрахунку прогнозно-розрахункової моделі залізобетонної ферми прольотом 24 м.

Ключові слова: прогнозно-розрахункова модель, позапроектний вплив, залізобетонна ферма, пошкодження, розвантаження, організаційно-технологічні рішення, монтажний майданчик.

Вступ. В процесі обстеження промислових об'єктів, пошкоджених внаслідок збройної агресії РФ, одним з розповсюджених дефектів можна назвати обвалення плит покриття, при цьому внаслідок падіння уламків конструкції та потрапляння уламків сторонніх предметів часто виникають пошкодження елементів ферми. Ці пошкодження не призводять до обвалення ферми, але суттєво впливають на роботу конструкцій та їх несучу здатність. Визначення можливості їх тимчасової подальшої експлуатації дозволяє зберегти основну несучу конструкцію до моменту виконання ремонтних робіт, зменшити обсяг робіт з демонтажу та відновлення конструкцій будівлі.

Проектування організаційно-технологічних рішень з ліквідації та унеможливлення розвитку подальшого руйнування будівель внаслідок впливів, не передбачених при проектуванні, є маловивченим напрямком. З огляду на розглянуті джерела [1-9] дійсно існує певне підґрунтя: дослідження щодо підсилення конструкцій, підвищення вибухостійкості та розроблення окремих методів ліквідації й локалізації руйнувань, проте ці публікації переважно зосереджені на технічних аспектах підсилення (наприклад, зовнішнє армування, застосування композитів тощо), а також на теоріях попередження та мінімізації прогресуючих руйнувань. Водночас комплексний підхід, що поєднує організаційно-технологічні стратегії реагування (оперативність, логістика, координація робіт, планування етапів відновлення тощо) із технічними методами захисту будівель від позапроектних навантажень, залишається відносно малорозвиненим. Тож питання проектування саме організаційно-технологічних рішень у контексті швидкого й ефективного подолання наслідків впливів, не передбачених при проектуванні, частково розкрито, але потребує подальших системних досліджень та узагальнення існуючих напрацювань.

Традиційне організаційно-технологічне проектування (розробка проекту організації будівництва (ПОБ) та проекту виконання робіт (ПВР)) зазвичай вимагає ретельного аналізу

вихідних даних: досліджень стану навколишнього середовища, можливостей промислового підприємства, його матеріально-технічної бази тощо. Усе це потребує чимало часу, як і підготовка будівельного майданчика, яка передбачає низку підготовчих і погоджувальних заходів. Проте у разі виникнення аварійної ситуації або катастрофи на виробництві, що спричинила загрозу раптового руйнування конструкцій, таких часових ресурсів зазвичай немає. Отже, постає потреба в оперативній розробці заходів, здатних мінімізувати час прийняття рішень і зменшити ризик малоефективних дій у ситуаціях, коли інформація про пошкоджену промислову будівлю є обмеженою чи неповною.

Оптимізувати процес вибору рішень в умовах невизначеності можна завдяки наперед підготовленим типовим організаційно-технологічним заходам з відновлення та покрової методології їх упровадження для поширених видів промислових об'єктів. Використання раніше розроблених типових технічних рішень у поєднанні з прогнозно-розрахунковими моделями дає змогу швидше підібрати та адаптувати оптимальний спосіб протиаварійного чи відновлювального втручання під конкретні умови реального пошкодження.

Серед промислових споруд, пошкоджених через впливи, не передбачені при проектуванні, чи техногенні аварії, значну частку становлять типові будівлі загального призначення, що зводилися масово за єдиними проектами або системами (наприклад, збірні залізобетонні або сталеві каркаси). Оскільки вони охоплюють великий сегмент промислового фонду, підвищення ефективності ліквідації та локалізації розвитку руйнувань саме в таких об'єктах є актуальною техніко-економічною задачею. Швидке визначення оптимальних заходів із тимчасового підпирання чи протиаварійного підсилення на основі моделювання прогнозно-розрахункової моделі, а також баз даних типових конструктивних, технологічних і організаційних рішень, суттєво знижує ризик подальших руйнувань і скорочує строки простою виробництва.

За результатами аналізу наукових праць вітчизняних та зарубіжних дослідників [10-14] встановлено, що застосування прогнозно-розрахункових моделей у контексті ліквідації аварійних ситуацій на об'єктах промислового призначення вивчено недостатньо. І хоча в низці досліджень розглядаються окремі аспекти прогнозування технічного стану конструкцій, зокрема із використанням аналітичних або машинних методів, більшість таких робіт зосереджені на житлових і громадських будівлях або орієнтовані на довгостроковий моніторинг, а не на оперативну оцінку та прийняття рішень у надзвичайних ситуаціях. Застосування методології прогнозно-розрахункового моделювання для оптимізації організаційно-технологічних рішень у разі руйнування конструкцій саме промислових будівель, з урахуванням вимог до відновлення функціональності виробничого процесу, досі залишається фрагментарним. Методи розрахунку впливу позапроектних навантажень на конструкції промислової будівлі, що зазнала пошкоджень, але зберегла загальну стійкість, передбачають наявність саме прогнозно-розрахункової моделі, яка відображає взаємодію між елементами конструктивної системи та зовнішніми впливами, не передбаченими первинним проектом.

Проаналізовані публікації свідчать, що хоча окремі дослідження демонструють ефективність поєднання розрахункових моделей з елементами прогнозування, наприклад, у структурному аналізі, оцінці залишкової міцності або плануванні підсилення, системного підходу до побудови прогнозно-розрахункових моделей у контексті термінового реагування та прийняття оперативних технічних рішень не сформовано. Це підкреслює актуальність розробки та впровадження відповідної методології саме для об'єктів промислового типу, де часові обмеження на відновлення, технологічна складність і потенційні економічні втрати є критичними факторами.

Мета роботи – розробити алгоритмічну послідовність дій побудови інформаційної та математичної прогнозно-розрахункової моделі, яка дозволяє оцінити зміну технічного стану конструктивних елементів після дії впливу, не передбаченого при проектуванні, та апробувати її на прикладі розрахунку прогнозно-розрахункової моделі великопрольотної залізобетонної ферми.

Основне дослідження. У роботі розглянуто вплив навантажень, не передбачених при проектуванні, на конструкції промислової будівлі, що зазнала пошкоджень, але зберегла загальну стійкість. У таких випадках особливого значення набуває своєчасне виявлення та усунення зароз розвитку позапроектних деформацій або прогресуючого руйнування. Це

досягається шляхом реалізації першочергових відновлювальних заходів, вибраних із використанням прогнозно-розрахункової моделі та бази даних типових рішень.

Оскільки пошкоджена конструкція зберігає несучу здатність, задача моделювання подальшого розвитку впливів та вибору технічного рішення розглядається як багатофакторна. Її вирішення потребує формування низки припущень і схематизації конструктивної схеми та характеру впливів. У разі обмеженості вихідних даних рішення можуть прийматися на основі експертної оцінки, а ефективність запропонованих варіантів визначається із застосуванням «функції корисності», яка дозволяє обґрунтовано порівняти альтернативи за критеріями безпеки, технологічної доцільності та економічної ефективності.

Узагальнена прогнозно-розрахункова модель розглядається як спрощений перехід від фізичної системи промислової будівлі до математичної моделі, що використовується для оцінки поточного стану конструкцій та прогнозування можливого розвитку пошкоджень. Ефективним підходом до побудови такої моделі передбачається використання методу скінченних елементів (МСЕ), який дозволяє формалізувати складні просторові системи шляхом поділу їх на компоненти простої геометрії. Прогнозно-розрахункова модель, побудована на основі МСЕ, забезпечує можливість не лише аналізу поточного стану пошкоджених конструкцій, а й прогнозування їх подальшої поведінки під впливом змінних умов навантаження. Це дозволяє використовувати її як інструмент для прийняття обґрунтованих технічних рішень у процесі ліквідації наслідків впливу, не передбаченого при проєктуванні.

Вирішенню поставленої задачі сприятиме узагальнена прогнозно-розрахункова модель ферми, сформована в середовищі розрахункового комплексу, яка дозволяє оцінити зміну технічного стану конструктивних елементів після дії впливів, не передбачених при проєктуванні. На відміну від підходів, що враховують умовні параметри джерела навантаження, модель орієнтована на відображення фактичних пошкоджень конструкції, таких як деформації або відсутність окремих елементів, зафіксованих в результаті обстеження. Це дозволяє здійснювати подальший аналіз із позиції реального стану об'єкта без прив'язки до характеру чи джерела дії.

У даній роботі для розв'язання задачі оцінки технічного стану конструкцій та обґрунтування подальших заходів із підсилення використовується прогнозно-розрахункова модель, побудована за результатами обстеження конструкцій впливу, не передбаченого при проєктуванні. Прогнозно-розрахункова модель виконує ключову функцію у процесі аналізу несучої здатності конструктивних елементів будівлі в поточному стані, моделювання їх поведінки під дією зовнішніх навантажень, а також прогнозування ефективності майбутніх відновлювальних рішень. Її головною відмінністю від традиційної розрахункової моделі є орієнтація на стан конструкцій після ушкодження з урахуванням змін у несучій схемі. Модель дозволяє здійснювати чисельне моделювання з урахуванням уже виявлених пошкоджених або частково зруйнованих елементів і застосовується як основа для прийняття рішень щодо тимчасового підпирання, протиаварійного підсилення та подальшої консервації.

При побудові та подальшому використанні прогнозно-розрахункової моделі враховуються зовнішні та внутрішні фактори, які можуть впливати на залишкову працездатність конструктивної системи. Серед них – експлуатаційні та кліматичні навантаження, зокрема снігове та вітрове, які можуть викликати додаткові деформації пошкоджених елементів. Особливу увагу також приділяють антропогенним чинникам: додатковим навантаженням у вигляді пересування людей, транспорту або роботи мостових кранів у промислових будівлях. Прогнозно-розрахункова модель адаптується до зміни конструктивної схеми внаслідок влаштування тимчасового підпирання. Тобто у процесі моделювання враховується поява нових елементів (наприклад, підпірних стоеків, рам або монтажних майданчиків), які частково перебирають зусилля від ослаблених елементів. Це дозволяє оцінити наскільки ефективно запропоновані заходи стабілізують конструкцію та чи доцільним є наступне підсилення або заміна окремих вузлів.

На рисунку 1 представлено узагальнений вигляд конструктивної схеми досліджуваної промислової будівлі, де умовно позначено фактичний стан елементів: зруйновані, пошкоджені або непошкоджені. До аналізу у прогнозно-розрахунковій моделі залучаються виключно ті елементи, які за результатами обстеження зазнали пошкоджень, але зберігають залишкову несучу здатність, що дозволяє виконати їх тимчасове підпирання та подальше протиаварійне підсилення. Повністю зруйновані елементи розглядаються як втрачені й не беруть участі в

моделюванні, однак їх відсутність впливає на перерозподіл зусиль у суміжних частинах конструкції. Такий підхід дозволяє сформувати реалістичну розрахункову модель для прийняття обґрунтованих технічних рішень, адаптованих до фактичного стану будівлі, без необхідності встановлення джерела пошкодження чи визначення його параметрів. Таким чином, пріоритетом є не реконструкція історії навантаження, а аналіз поточного стану та прогноз подальшої поведінки системи з урахуванням усіх актуальних впливів.

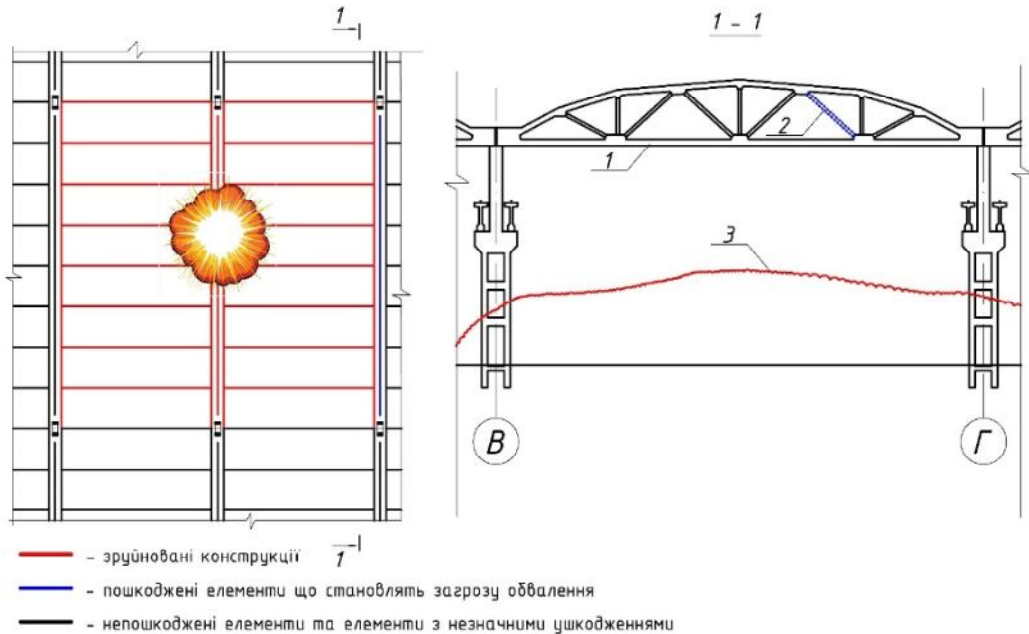


Рис. 1. Схема пошкоджень промислової будівлі внаслідок впливу, не передбаченого при проектуванні: 1 – пошкоджена конструкція (залізобетонна ферма); 2 – місце пошкодження конструкції (розкос); 3 – зруйновані конструкції

Вихідними даними для побудови прогнозно-розрахункової моделі є: проектна документація на промислову будівлю або її типова розрахункова схема; значення фізико-механічних характеристик матеріалів, прийнятих у проекті або отриманих за результатами обстеження; допустимі відхилення геометричних параметрів та характеристик міцності конструкцій згідно з нормативними документами або фактично встановлені в процесі діагностики; постійні, довготривалі та короткочасні експлуатаційні навантаження, характерні для даного типу промислової споруди, включаючи вагу обладнання, вплив мостового крану, снігове та вітрове навантаження; інформація про пошкоджені або деформовані елементи конструкції, встановлена за результатами візуального та інструментального обстеження.

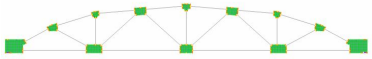
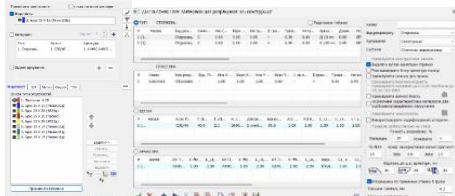
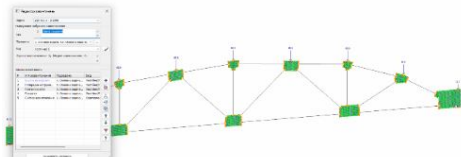
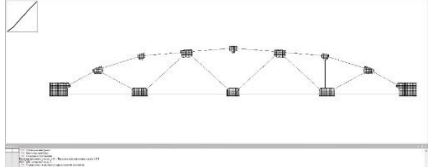
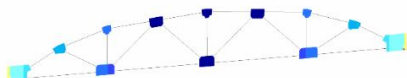

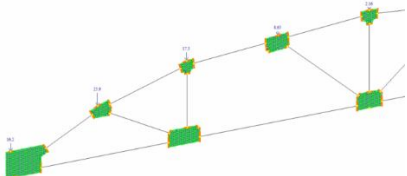
Також враховуються геометричні параметри та розрахункові характеристики елементів, що планується застосовувати для тимчасового підпирання, у тому числі металевих стояків, монтажних майданчиків або іншого інвентарного обладнання. Ці дані використовуються для варіативного моделювання технічного стану будівлі до та після виконання стабілізаційних заходів. Прогнозно-розрахункова модель дає змогу оцінити, наскільки ефективно тимчасове підпирання впливає на перерозподіл зусиль у системі та забезпечує її стійкість у перехідному стані до моменту виконання протиаварійного підсилення.

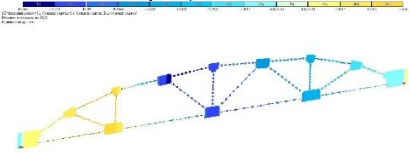

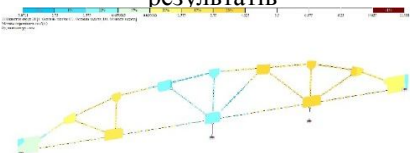

Далі (таблиця 1) наведено запропоновану алгоритмічну послідовність дій в розрахунковому комплексі «ЛПРА-САПР» на прикладі залізобетонної ферми прольотом 24 метри, що зазнала пошкоджень зі втратою одного з елементів. При підготовці до розрахунку виконують аналіз конструктивних й об'ємно-планувальних особливостей будівлі, які є важливими для коректного формування розрахункової моделі. Формування моделі здійснюється за принципом послідовної деталізації: від базових, умовно спрощених моделей, що включають окремі несучі елементи (наприклад, ферму чи частину каркасу), до повних математичних моделей будівлі, створення яких

доцільне у випадку необхідності аналізу загальної просторової роботи споруди. До моделі включаються лише ті елементи, несуча здатність яких могла бути порушена внаслідок впливу, і які потребують подальшого оцінювання, тимчасового підпирання та протиаварійного підсилення. Окрім того, до розрахункової схеми доцільно включати конструктивні елементи, які за певних умов можуть залучатися до роботи системи, наприклад, опорні колони при моделюванні роботи ферми. Саме така модель забезпечує можливість виконання варіативного прогностичного аналізу з урахуванням подальших стабілізаційних заходів і є основою для прийняття інженерних рішень.

Таблиця 1

Побудова розрахункової інформаційної та математичної моделі в програмному комплексі «ЛІРА-САПР»

Етапи моделювання	Короткий опис етапу моделювання
1	2
Етап 1. Побудова геометрії елементів розрахункової моделі	Розрахункова схема елемента 
Етап 2. Застосування властивостей матеріалів до конструктивних елементів	Введення фізико-механічних показників конструктивних елементів 
Етап 3. Застосування проектних навантажень на розрахункову модель	Прикладання навантаження 
Етап 4. Проведення розрахунку без урахування пошкоджень конструкцій	Нелінійний розрахунок конструкції 
Етап 5. Аналіз результатів розрахунку будівлі (без пошкоджень)	Аналіз ізополів переміщень та фіксація результатів 
Етап 6. Коригування розрахункової моделі з урахуванням пошкоджень	Внесення змін до розрахункової схеми конструкції з врахуванням виявлених при обстеженні пошкоджень 
Етап 7. Редагування навантажень, моделювання наслідків вибуху	Введення параметрів навантаження 

1	2
<p>Етап 8. Проведення розрахунку та аналіз отриманих результатів</p>	<p>Нелінійний розрахунок, аналіз ізополів переміщень, фіксація результатів</p> 
<p>Етап 9. Моделювання системи тимчасового підпирання з піддомкочуванням за допомогою монтажного майданчика</p>	<p>Визначається можливість підпирання конструкції та піддомкочування за допомогою монтажного майданчика та вносяться нові граничні умови</p> 
<p>Етап 10. Розрахунок та аналіз моделі із системою підпирання та піддомкочування</p>	<p>Нелінійний розрахунок, аналіз ізополів переміщень, фіксація результатів</p> 
<p>Етап 11. Моделювання протиаварійного підсилення з допомогою монтажного майданчика</p>	<p>У модель з пошкодженнями вносяться додаткові елементи підсилення та виконується перевірка підібраного перерізу, перевіряється можливість використання монтажного майданчика для обраних типів робіт</p> 

Наведемо приклад відповідного розрахунку ферми прольотом 24 м, основними завданнями якого є: перевірка відсутності загального руйнування її конструкції при втраті елемента на різних етапах тимчасового підсилення з використанням монтажного майданчика та сталевих стоек; визначення ефективності розвантаження пошкодженої ферми при даному підсиленні з врахуванням обмеження сумарного допустимого навантаження (складає 100 кН), що передається стойками на монтажний майданчик.

На початку розглядаються пошкодження розкосів та стійок конструкцій ферми без влаштування додаткових підпірок та без підсилення конструкцій ферми, тобто залишкова несуча здатність основної конструкції з отриманим дефектом. Здебільшого конструкції ферм, які отримали такого типу пошкодження, мають знижене навантаження через падіння одного ряду плит, тому у роботі розглянуто варіант навантаження, зменшеного в два рази у порівнянні з повним.

Будівля розглядається з прольотами 24 м з кроком ферм 12 м. Плити покриття ребристі розміром 3x12 м, без ліхтарів.

Основні навантаження, що враховувалися при розрахунках:

- 1) Власна вага ферми
- 2) Попереднє напруження ферми.
- 3) Власна вага конструкцій плит покриття (35 кН на вузол);
- 4) Вага шарів покриття (табл. 2).

В розрахунковій схемі врахований ексцентриситет прикладання навантаження від плит покриття, що дозволяє більш детально проаналізувати роботу пошкодженої конструкції. Загальна розрахункова схема конструкції залізобетонної ферми наведена на рис. 2.

Розглянуті схеми пошкоджених конструкцій, що підлягають аналізу наведені на рис. 3.

Таблиця 2

Склад основних розрахункових вертикальних навантажень на 1 м^2 конструкції покриття

Навантаження	Нормативне значення навантаження, кН/м^2	Коеф. надійності за навантаженням, γ_{fm}	Розрахункове значення навантаження, кН/м^2
Три шари руберойду	0.050	1.2	0.060
Цементно-піщана стяжка ($t=50 \text{ мм}$)	0.883	1.1	0.971
Засипка керамзитом ($t=150 \text{ мм}$)	0.736	1.2	0.883

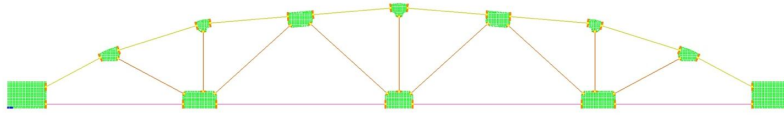


Рис. 2. Загальна розрахункова схема конструкції залізобетонної ферми

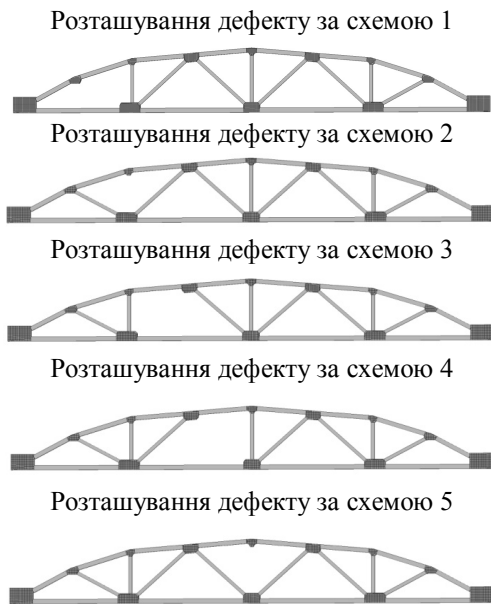


Рис. 3. Схеми розташування дефекту ферми

постановці з врахуванням характеристичних значень міцнісних параметрів матеріалів залізобетону, що є допустимим для перевірки надійності в аварійних розрахункових ситуаціях згідно ДБН [15, 16]. В такому випадку на кожному кроці розрахунку контролюється відсутність загального руйнування конструкції ферми.

Для всіх схем розташування пошкодження (рис. 3) розглянутий варіант спирання одного стовпика посередині нижнього поясу (рис. 4), за виключенням схеми 5, для якої відбулася втрата середнього вертикального елемента ферми, що створює несприятливий напружено-деформований стан при підпиранні ферми під середнім нижнім вузлом.

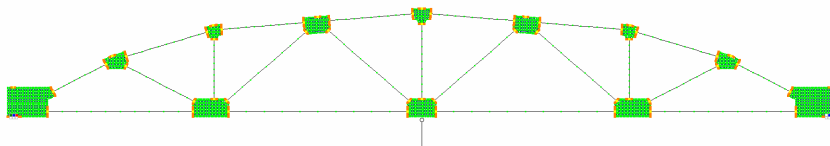


Рис. 4. Варіант спирання одного стовпика посередині нижнього поясу ферми

В цілому розглядається наступний сценарій, змодельований у розрахунку. Початково пошкоджена ферма сприймає зменшені (без врахування обвалених плит покриття) навантаження без розвантажувальних стояків та елементів підсилення. З метою розвантаження пошкодженої ферми перед підсиленням та повноцінного включення майбутніх елементів підсилення у роботу влаштовуються відповідні сталеві стояки (зі спиранням на них ферми у вузлах). Шляхом піддомкращування відбувається включення даних елементів в роботу зі сприйняттям частини навантаження від ферми. Критерієм завершення процесу є виведення точки спирання ферми на стояк у початковий стан до прикладення навантажень (результативне переміщення по вертикальній вісі $\Delta_z = 0$). У випадку застосування 2-х стояків в нуль виводиться точка спирання найбільш звантаженого стояку.

Розрахунок проводиться у нелінійній

Для схем пошкоджень 1-4 на рис. 5 наведений розглянутий варіант підпирання 2-ма стояками.

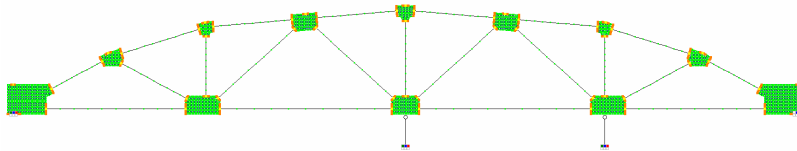


Рис. 5. Варіант спирання двох стаяків на вузли нижнього поясу ферми

Для схеми 5 та додатково для схеми 4 (підваріант 4б) розглянутий варіант на рис. 6.

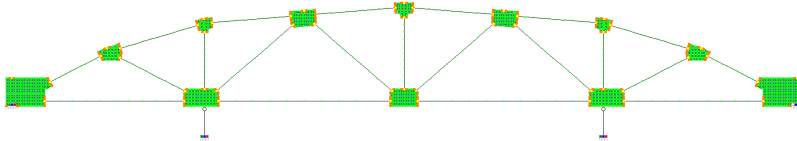


Рис. 6. Варіант симетричного спирання двох стаяків на вузли нижнього поясу ферми

За результатами нелінійних розрахунків за всіма схемами ушкодження загального руйнування ферми до появи розвантажувальних стаяків не відбулося для жодної з них.

Для оцінки варіантів підпирання стаяками складені графіки залежності повздовжнього зусилля в них від деформаційного навантаження у нижньому вузлі стаяку, завданого вертикальним зміщенням у міліметрах. При аналізі розрахунків враховано обмеження сумарного навантаження на стаяки 100 кН.

На рис. 7 наведені графіки зусиль у стаяках для схеми пошкодження 1. З наведених графіків можливо зробити висновок про приблизно однакову ефективність варіантів з одним стаяком та з двома з точки зору необхідного сумарного зусилля піддомкращування. При цьому незначна перевага є у варіанту з одним стаяком (113 кН зусилля проти 118 кН, різниця менше 5%). Враховуючи обмеження зусилля у 100 кН, рівень розвантаження ферми може бути досягнутий на рівні 85-88% від спочатку запланованого.

На рис. 8 наведені графіки зусиль у стаяках для схеми пошкодження 2. З наведених графіків можливо зробити висновок про перевагу варіанту з одним стаяком у порівнянні з двома (114кН зусилля проти 134кН, різниця 15%). Враховуючи обмеження зусилля у 100 кН, рівень розвантаження ферми може бути досягнутий на рівні 88% від спочатку запланованого для варіанту з одним стаяком та 75% для 2-х стаяків.

На рис. 9 наведені графіки зусиль у стаяках для схеми пошкодження 3. З наведених графіків можливо зробити висновок про значну перевагу варіанту з одним стаяком у порівнянні з двома (96 кН зусилля проти 150 кН, різниця у 1,56 рази). Враховуючи обмеження зусилля у 100 кН, рівень розвантаження ферми може бути досягнутий повністю відповідно до спочатку запланованого для варіанту з одним стаяком та всього 67% для 2-х стаяків.

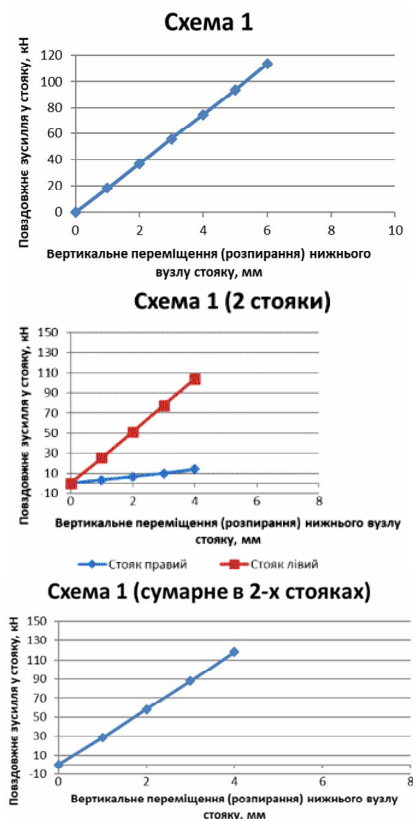


Рис. 7. Графіки зусиль у стаяках для схеми пошкодження 1

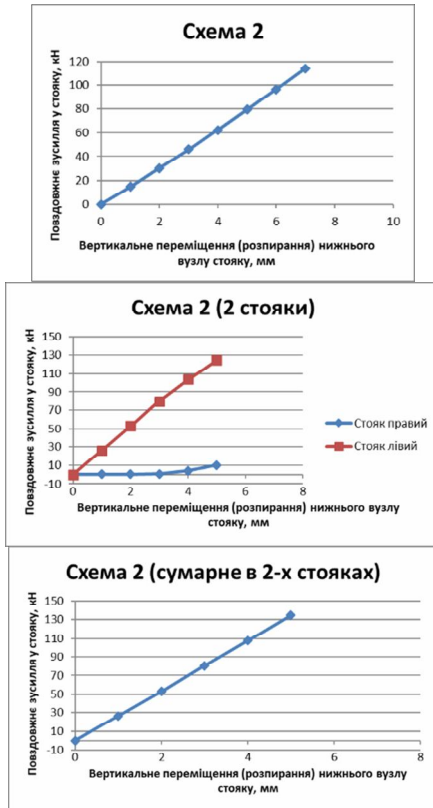


Рис. 8. Графіки зусиль у стояках для схеми пошкодження 2

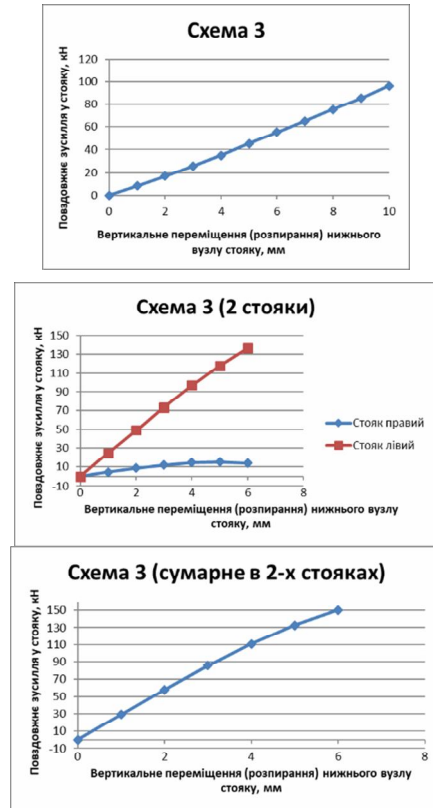


Рис. 9. Графіки зусиль у стояках для схеми пошкодження 3

На рис. 10 наведені графіки зусиль у стояках для схеми пошкодження 4. З наведених графіків можливо зробити висновок про значну перевагу варіанту з одним стояком у порівнянні з двома (53 кН зусилля проти 115 кН для підваріанту 4а та 161 кН для підваріанту 4б, різниця у 2,17-3,04 рази). Враховуючи обмеження зусилля у 100 кН, рівень розвантаження ферми може бути досягнутий повністю (зі значним запасом) відповідно до спочатку запланованого для варіанту з одним стояком та всього 33-46% для 2-х стояків.

На рис. 11 наведені графіки зусиль у стояках для схеми пошкодження 5. Для даної схеми варіант з одним стояком не розглядався, враховуючи відсутність центрального вертикального елемента ферми (та відповідного несприятливого напружено-деформованого стану при підпиранні під центральним нижнім вузлом). Враховуючи обмеження зусилля у 100 кН, рівень розвантаження ферми може бути досягнутий всього 69% від спочатку запланованого.

Слід відмітити, що випадків загального руйнування ферми після початку влаштування монтажного майданчика з підпирними стояками не виявлено.

Висновки. В роботі запропоновано алгоритмічну послідовність дій побудови інформаційної та математичної прогнозно-розрахункової моделі (на прикладі залізобетонної ферми промислової споруди) у середовищі розрахункового комплексу, яка дозволяє оцінити зміну технічного стану конструктивних елементів після дії позапроектного впливу.

Наведений приклад відповідного розрахунку прогнозно-розрахункової моделі ферми прольотом 24 м, основними завданнями якого були: перевірка відсутності загального руйнування її конструкції при втраті елемента на різних етапах тимчасового підсилення з використанням монтажного майданчика та сталевих стояків; визначення ефективності розвантаження пошкодженої ферми при даному підсиленні з врахуванням обмеження сумарного допустимого навантаження, що передається стояками на монтажний майданчик.

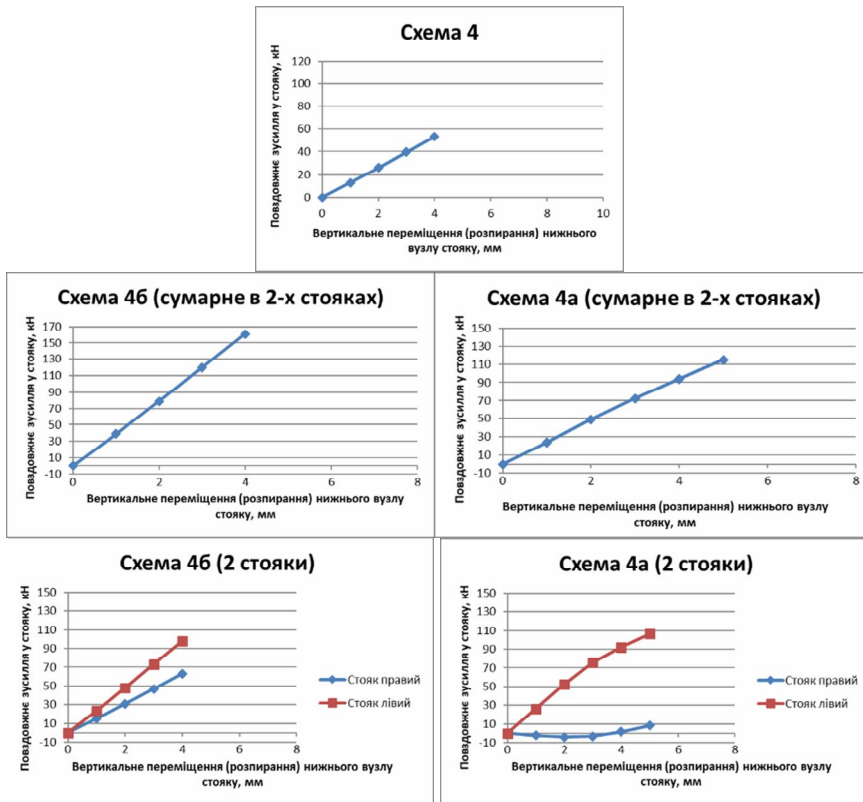


Рис. 10. Графіки зусиль у стояках для схеми пошкодження 4

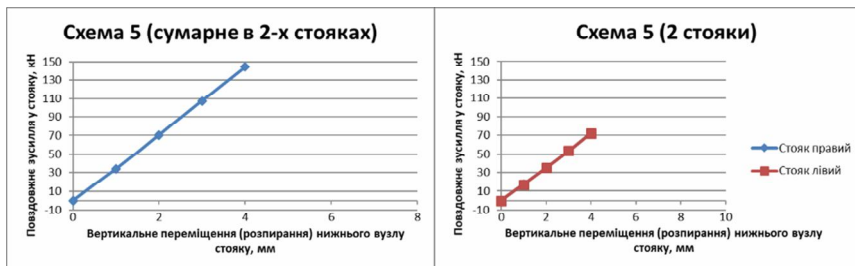


Рис. 11. Графіки зусиль у стояках для схеми пошкодження 5

Виявлена суттєва перевага (у необхідному загальному зусиллі у стояках розвантаження) варіанту з одним стояком у порівнянні з двома. При цьому дана перевага збільшується з приблизно 5% до 3 разів при зміні розташування відсутнього елемента ферми від краю до середини ферми (послідовному переході від схеми 1 до схеми 4).

Запланований рівень розвантаження ферми може бути повністю досягнутий з застосуванням одного стояку для схем пошкодження 3 і 4 та на 88% для схем 1 і 2. Варіанти з застосуванням 2-х стояків є суттєво менш ефективними (33-85% від запланованого рівня розвантаження).

Випадків загального руйнування ферми для будь-якого варіанту та на будь-якому етапі розрахунку не виявлено.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Деякі питання проведення обстеження прийнятих в експлуатацію об'єктів будівництва: Постанова Кабінету Міністрів України від 12.04.2017 № 257. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/257-2017-п> (дата звернення 02.06.2025).

2. Про деякі питання здійснення невідкладних робіт з ліквідації наслідків збройної агресії: Постанова Кабінету Міністрів України від 19.04.2022 № 473. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/473-2022-п> (дата звернення 02.06.2025).
3. Методика проведення обстеження та оформлення його результатів: Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 06.08.2022 № 144. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0898-22#Text> (дата звернення 02.06.2025).
4. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова з оцінювання технічного стану будівель і споруд. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон, 2016. 88 с.
5. ДБН В.1.2-14:2018. Система надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Основні положення. [Чинний від 2018-08-02] Вид. офіц. Київ: Мінрегіон, 2018. 64 с.
6. ДСТУ Б В.3.1-2:2016. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних конструкцій та основ будівель і споруд. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон, 2016. 120 с.
7. European Committee for Standardization. EN 1991-1-7:2006 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-7: Accidental actions. – Brussels: CEN, 2006. – 57 p.
8. International Organization for Standardization. ISO 13822:2010 Bases for design of structures – Assessment of existing structures. – Geneva: ISO, 2010. – 90 p.
9. International Organization for Standardization. ISO 2394:2015 General principles on reliability for structures. – Geneva: ISO, 2015. – 110 p.
10. European Committee for Standardization. EN 1998-3:2005 Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. – Brussels: CEN, 2005. – 74 p.
11. Federal Emergency Management Agency. FEMA P-2055: Post-disaster Building Safety Evaluation Guidance. – Washington (DC): FEMA, 2019. – 410 p. – URL: <https://www.fema.gov> (дата звернення 02.06.2025).
12. Applied Technology Council. ATC-20-1: Field Manual: Post-earthquake Safety Evaluation of Buildings, 2nd ed.; ATC-45: Safety Evaluation of Buildings after Windstorms and Floods. – Redwood City (CA): ATC, 2005 / 2004. – 140 p.
13. American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 59-11: Blast Protection of Buildings. – Reston (VA): ASCE, 2011. – 256 p.
14. American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. – Reston (VA): ASCE, 2017. – 562 p.
15. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. [На заміну ДБН В.1.2-14:2009; чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ: Укрархбудінформ, 2018. 30 с.
16. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [На заміну СНиП 2.03.01-84*; чинний від 2011-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.

REFERENCES

1. Деякі питання проведення обстеження прийнятних в експлуатації об'єктів будівництва: Постанова Кабінету Міністрів України від 12.04.2017 No. 257 (Some issues of conducting inspections of commissioned construction objects: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 12, 2017, No. 257). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/257-2017-п> (accessed: 02.06.2025).
2. Про деякі питання здійснення невідкладних робіт з ліквідації наслідків збройної агресії: Постанова Кабінету Міністрів України від 19.04.2022 No. 473 (On some issues of carrying out urgent works to eliminate the consequences of armed aggression: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 19, 2022, No. 473). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/473-2022-п> (accessed: 02.06.2025).
3. Методика проведення обстеження та оформлення його результатів: Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 06.08.2022 No. 144 (Methodology for conducting inspections and formalizing their results: Order of the Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine dated August 6, 2022, No. 144). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0898-22#Text> (accessed: 02.06.2025).
4. DSTU-N B V.1.2-18:2016. Nastanova z otsiniuvannya tekhnichnoho stanu budivel i sporud (Guidelines for assessing the technical condition of buildings and structures). Kyiv: Minrehion, 2016. 88 p.
5. DBN V.1.2-14:2018. Systema nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel i sporud. Osnovni polozhennia [System of reliability and structural safety of buildings and structures. Basic provisions]. Kyiv: Minrehion, 2018. 64 p.
6. DSTU B V.3.1-2:2016. Remont i pidsylennia nesuchykh i ohorodzhvalnykh konstrukttsii ta osnov budivel i sporud [Repair and strengthening of load-bearing and enclosing structures and foundations of buildings and structures]. Kyiv: Minrehion, 2016. 120 p.
7. European Committee for Standardization. EN 1991-1-7:2006 Eurocode 1 – Actions on structures– Part 1-7: Accidental actions. – Brussels: CEN, 2006. – 57 p.
8. International Organization for Standardization. ISO 13822:2010 Bases for design of structures– Assessment of existing structures. – Geneva: ISO, 2010. – 90 p.
9. International Organization for Standardization. ISO 2394:2015 General principles on reliability for structures. – Geneva: ISO, 2015. – 110 p.
10. European Committee for Standardization. EN 1998-3:2005 Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance– Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. – Brussels: CEN, 2005. – 74 p.
11. Federal Emergency Management Agency. FEMA P-2055: Post-disaster Building Safety Evaluation Guidance. – Washington (DC): FEMA, 2019. – 410 p. – URL: <https://www.fema.gov> (Accessed 02.06.2025).

12. Applied Technology Council. ATC-20-1: FieldManual: Post-earthquake Safety Evaluation of Buildings, 2nd ed.; ATC-45: Safety Evaluation of Buildings after Windstorms and Floods. – Redwood City (CA): ATC, 2005 / 2004. – 140 p.
13. American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 59-11: Blast Protection of Buildings. – Reston (VA): ASCE, 2011. – 256 p.
14. American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. – Reston (VA): ASCE, 2017. – 562 p.
15. Zahalni pryncypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud (General principles of ensuring reliability and structural safety of buildings and structures). Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2018. 30 p.
16. DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia (Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions). Kyiv: MinrehionbudUkrainy, 2011. 71 p.

Стаття надійшла 08.12.2025

Tugai O.A., Kozak A.A., Khokhlin D.O., Bozhynskiy M.O.

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ З ЛОКАЛІЗАЦІЇ РУЙНУВАНЬ, СПРИЧИНЕНИХ ВПЛИВАМИ, НЕ ПЕРЕДБАЧЕНИМИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ

У роботі розглянуто вплив навантажень, не передбачених при проектуванні, на конструкції промислової будівлі, що зазнала пошкоджень, але зберегла загальну стійкість.

Загальнена прогнозно-розрахункова модель розглядається як спрощений перехід від фізичної системи промислової будівлі до математичної моделі, що використовується для оцінки поточного стану конструкцій та прогнозування можливого розвитку пошкоджень. Ефективним підходом до побудови такої моделі передбачається використання методу скінчених елементів (МСЕ), який дозволяє формалізувати складні просторові системи шляхом поділу їх на компоненти простої геометрії. Прогнозно-розрахункова модель, побудована на основі МСЕ, забезпечує можливість не лише аналізу поточного стану пошкоджених конструкцій, а й прогнозування їх подальшої поведінки під впливом змінних умов навантаження. Це дозволяє використовувати її як інструмент для прийняття обґрунтованих технічних рішень у процесі ліквідації наслідків впливу, не передбаченого при проектуванні.

Запропоновано алгоритмічну послідовність дій для побудови інформаційної та математичної прогнозно-розрахункової моделі (на прикладі залізобетонної ферми промислової споруди) у середовищі розрахункового комплексу, яка дозволяє оцінити зміну технічного стану конструктивних елементів після дії впливу, не передбаченого при проектуванні.

Наведений приклад відповідного розрахунку прогнозно-розрахункової моделі ферми прольотом 24 м, основними завданнями якого були: перевірка відсутності загального руйнування її конструкції при втраті елемента на різних етапах тимчасового підсилення з використанням монтажного майданчика та сталевих стоек; визначення ефективності розвантаження пошкодженої ферми при даному підсиленні з врахуванням обмеження сумарного допустимого навантаження, що передається стойками на монтажний майданчик.

Виявлена суттєва перевага (у необхідному загальному зусиллі у стойках розвантаження) варіанту з одним стоекм у порівнянні з двома. При цьому дана перевага збільшується з приблизно 5% до 3 разів при зміні розташування відсутнього елемента ферми від краю до середини ферми.

Запланований рівень розвантаження ферми може бути повністю досягнутий з застосуванням одного стоекю для двох з чотирьох схем пошкодження та на 88% для двох інших. Варіанти з застосуванням 2-х стоеків є суттєво менш ефективними (33-85% від запланованого рівня розвантаження).

Випадків загального руйнування ферми для будь-якого варіанту та на будь-якому етапі розрахунку не виявлено.

Ключові слова: прогнозно-розрахункова модель, позапроектний вплив, залізобетонна ферма, пошкодження, розвантаження, організаційно-технологічні рішення, монтажний майданчик.

Tugai O.A., Kozak A.A., Khokhlin D.O., Bozhynskiy M.O.

USING THE FINITE ELEMENT METHOD TO DETERMINE THE POSSIBILITY OF APPLICATION AND IMPROVEMENT OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR LOCALIZATION OF DESTRUCTMENTS CAUSED BY INFLUENCES NOT FORESEED DURING DESIGN

The article examines the impact of off-design loads on the structures of an industrial building that was damaged but retained its overall stability.

The generalized predictive and computational model is considered as a simplified transition from the physical system of an industrial building to a mathematical model used to assess the current state of structures and predict the possible development of damage. An effective approach to building such a model involves the use of the finite element method (FEM), which allows for the formalization of complex spatial systems by dividing them into components of simple geometry. The predictive and computational model, built based on FEM, provides the ability not only to analyze the current state of damaged structures, but also to predict their further behavior under the influence of variable loading conditions. This allows it to be used as a tool for making informed technical decisions in the process of eliminating the consequences of off-design impacts.

An algorithmic sequence of actions for building an information and mathematical predictive and calculation model (using the example of a reinforced concrete truss of an industrial structure) in the environment of a calculation complex is proposed, which allows assessing the change in the technical condition of structural elements after the action of an off-design impact.

An example of a corresponding calculation of a predictive and calculation model of a truss with a span of 24 m is given, the main tasks of which were: checking the absence of general destruction of its structure in the event of loss of an element at different stages of temporary reinforcement using an assembly platform and steel risers; determining the efficiency of unloading

a damaged truss with this reinforcement, taking into account the limitation of the total allowable load transmitted by the risers to the assembly platform.

A significant advantage (in the required total effort in the unloading risers) of the one-rise variant compared to two was found. This advantage increases from approximately 5% to 3 times when changing the location of the missing truss element from the edge to the middle of the truss.

The planned level of truss unloading can be fully achieved with the use of a single riser for two of the four damage patterns and 88% for the other two. The options using 2 risers are significantly less effective (33-85% of the planned level of unloading).

No cases of total truss failure were identified for any option and at any stage of the calculation.

Key words: predictive and calculation model, off-design impact, reinforced concrete truss, damage, unloading, organizational and technological solutions, assembly site.

УДК 693.814.26:621.88

Тугай О.А., Козак А.А., Хохлін Д.О., Божинський М.О. Використання методу скінчених елементів для визначення можливості застосування та удосконалення організаційно-технологічних рішень з локалізації руйнувань, спричинених впливами, не передбаченими при проектуванні // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2025. – Вип. 116. – С. 84-96.

У роботі запропоновано алгоритмічну послідовність дій для побудови інформаційної та математичної прогнозно-розрахункової моделі, яка дозволяє оцінити зміну технічного стану конструктивних елементів після дії впливу, не передбаченого при проектуванні. Наведений приклад відповідного розрахунку прогнозно-розрахункової моделі залізобетонної ферми прольотом 24 м.

Табл. 2. Іл. 11. Бібліогр. 16 назв.

UDC 693.814.26:621.88

Tugai O.A., Kozak A.A., Khokhlin D.O., Bozhynskiy M.O. Using the finite element method to determine the possibility of application and improvement of organizational and technological solutions for localization of destructions caused by influences not foreseen during design // Strength of Materials and Theory of Structures. Scientific-and-technical collected articles. – Kyiv: KNUBA, 2026. – Issue 116. – P. 84-96. – Eng.

The paper proposes an algorithmic sequence of actions for building an information and mathematical predictive and calculation model that allows assessing the change in the technical condition of structural elements after the action of an off-design impact. An example of the corresponding calculation of the predictive and calculation model of a reinforced concrete truss with a span of 24 m is given.

Tab. 2. Fig. 11. Ref. 16.

Автор: доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри організації та управління будівництвом ТУГАЙ Олександр Анатолійович

Адреса робоча: 03680, Україна, м. Київ, Повітряних Сил проспект, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ТУГАЮ Олександр Анатолійовичу

E-mail: alex2008dsl@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6255-3119>

Автор: кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА, КОЗАК Андрій Анатолійович

Адреса робоча: 03680, Україна, м. Київ, Повітряних Сил проспект, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, КОЗАКУ Андрію Анатолійовичу

Тел.: +38(044) 248-32-37

E-mail: kozak.aa@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3192-1430>

Автор: кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник ХОХЛІН Денис Олександрович

Адреса: 03110, Україна, м. Київ, проспект Валерія Лобановського, 51, ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва імені В.С. Балицького», ХОХЛІНУ Денису Олександровичу.

E-mail: den_a_khokh@meta.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0128-8515>

Автор: аспірант кафедри організації та управління будівництвом БОЖИНСЬКИЙ Михайло Олександрович

Адреса: 03680, Україна, м. Київ, Повітряних Сил проспект, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, БОЖИНСЬКОМУ Михайлу Олександровичу.

E-mail: mike.bozhynskyy@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8681-4675>