

*П.Г. Круковський, д-р техн. наук, професор
(Інститут технічної теплофізики НАН України),
І.В. Чала (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

АНАЛІЗ ТЕПЛООВОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НАВИСУ НАД ТРИБУНАМИ НСК «ОЛІМПІЙСЬКИЙ» ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЇХ ВОГНЕСТІЙКОСТІ В УМОВАХ РЕАЛЬНИХ ПОЖЕЖ

Наведені фізична і комп'ютерна моделі та результати розрахунку теплового стану несучих металевих конструкцій покриття над трибунами стадіону НСК "Олімпійський" (м. Київ) для подальшого оцінювання їх вогнестійкості при заданих сценаріях реальних пожеж, спричинених горінням стільців для глядачів та пожежі під однією з колон, що тримає навіс. Використано польовий метод аналізу процесів тепломасообміну (поля температур, тисків, швидкостей і концентрацій) у вибраній тривимірній області розрахунку та сучасна комп'ютерна програма, які реалізують чисельні методи розв'язання повної системи рівнянь Нав'є-Стокса.

Ключові слова: металеві конструкції, тепловий стан, реальні умови пожежі, вогнестійкість, моделювання.

Постановка проблеми та аналіз публікацій. Однією з важливих завдань пожежної безпеки є забезпечення несучої здатності будівельних конструкцій (колон, балок і ферм) на випадок пожежі протягом заданого часу.

Так, металеві конструкції, що виготовлені з конструкційних сталей, втрачають свою міцність, а з нею і несучу здатність при температурі понад 500°C, настання якої часто визначає межу вогнестійкості цих конструкцій [1]. Слід зазначити, що втрата несучої здатності конструкції значною мірою залежить від рівня механічного навантаження на конструкцію, тому її руйнування при великих навантаженнях може статися при температурі і нижчій за 500°C. Найбільш правильним критерієм втрати вогнестійкості окремих елементів, що входять в загальну (часто досить складну) металеву конструкцію, є критерій втрати стійкості цієї конструкції, що також може призводити до її руйнування в умовах пожежі, але при значно менших ніж 500°C значеннях температури конструкцій.

Для ряду будівельних конструкцій експериментальне визначення їх меж вогнестійкості у вогневих печах при стандартному температурному режимі [1] пов'язане з великими затратами або взагалі не можливе внаслідок великих габаритів цих конструкцій. У цьому випадку найбільш ефективним методом аналізу вогнестійкості таких конструкцій є розрахунковий або розрахунково-експериментальний методи [2].

При використанні розрахункових методів (методів математичного моделювання) обсяг і складність робіт з визначення межі вогнестійкості будівельних конструкцій істотно збільшуються у такій послідовності:

1. якщо розраховувати лише поля температур в металевому елементі конструкції (розв'язання задачі теплопровідності) і визначати межі вогнестійкості елемента за часом настання граничної температури (наприклад 500°C), – використовується критерій настання граничної температури;
2. якщо розраховувати поля температур, напружень і деформацій у металевому елементі конструкції (розв'язання задач термонапруженого стану) і визначати межі вогнестійкості елемента за часом настання втрати його несучої здатності (руйнування), - використовується критерій втрати його несучої здатності;
3. якщо розраховувати поля температур, напружень, деформацій і механічну стійкість металевого елемента та всієї конструкції, до якої він входить, (розв'язання задач термонапруженого стану і механічної стійкості) і визначати межі вогнестійкості елемента і всієї металеві конструкції за часом настання втрати стійкості, що також призводить до її руйнування, – використовується критерій втрати стійкості конструкції. Тут стійкістю

конструкції, що складається з ряду елементів, вважаємо її здатність зберігати свої форму, геометричні розміри, цілісність і функціональне призначення при термомеханічних деформаціях одного або декількох елементів конструкції внаслідок нагрівання під дією підвищеної температури.

Розглянуті випадки аналізу вогнестійкості за різними критеріями настання граничного стану елемента конструкції або всієї конструкції показують, що розрахунок їх теплового стану при впливі підвищення температури є основним етапом аналізу вогнестійкості металевих конструкцій, а втрата їх вогнестійкості залежно від конструктивної складності може відбуватися при різних рівнях температури – від декількох десятків і сотень градусів до температур вище 500°C.

Слід також додати, що розрахунок теплового стану конструкції для всіх згаданих вище випадків стає ще більш складним при аналізі вогнестійкості конструкцій в умовах впливу реальних умов пожежі. У цих випадках додатково до вищезгаданих задач необхідно вирішувати задачі термогазодинамічної взаємодії джерела пожежі з досліджуваними елементами конструкцій. Врахування такої взаємодії призводить до необхідності додаткового розрахунку полів тисків, швидкостей, концентрацій і температур гарячих газів в газовому середовищі, які описуються повною системою рівнянь Нав'є-Стокса [3].

В процесі розвитку реальної пожежі відбувається тепловий вплив гарячих газів на елементи конструкцій і вони нагріваються. При цьому температура конструкцій залежить від таких факторів:

- величина і калорійність пожежного навантаження, що вигоряє;
- взаємне розташування пожежного навантаження і конструкції;
- відстань від пожежного навантаження до конструкції;
- напрямок і швидкість руху гарячих продуктів згоряння, які для закритих пожеж визначаються формою і розмірами приміщення, в якому відбувається пожежа;
- ступінь задимленості гарячих продуктів згоряння і повітря та ін.

При цьому характер зміни температури біля досліджуваної конструкції і на її поверхні при реальній пожежі може бути довільним.

Головною проблемою оцінки вогнестійкості таких конструкцій у разі реальної пожежі поблизу них є розрахунок теплового стану цих конструкцій, які мають великі розміри і нагріваються на відстані під дією гарячих газів при вигорянні реальних пожежних навантажень. Існуючі стандартні підходи для розрахунків теплового стану таких конструкцій в стандартних умовах нагріву (типу [1]) для цього випадку не підходять. Тому найбільш дієвим методом є так званий польовий метод, який називається в літературі CFD (Computational Fluid Dynamics) метод, який є потужним і універсальним інструментом порівняно з іншими методами, наприклад інтегральними або зонними [3].

Однак технологія застосування польового методу моделювання динаміки розвитку реальної пожежі і оцінки вогнестійкості конструкцій є не простою, потребує певної кваліфікації та досвіду її користувачів, а також чіткого виконання певних правил і вимог її застосування. Тому правильне застосування польового методу моделювання динаміки розвитку реальної пожежі і оцінки вогнестійкості складних конструкцій є самостійною науково-практичною задачею, що складається з науково обґрунтованого вибору сценарію пожежі, побудови фізичної, математичної та комп'ютерної моделей, їх верифікації, отримання результатів аналізу вогнестійкості і частого вибору оптимальних заходів забезпечення заданої вогнестійкості конструкцій.

Так в роботі [4] за польовим методом в результаті побудови тривимірної моделі тепломасобміну між місцем пожежі і несучими конструкціями навісу над трибунами стадіону "МЕТАЛУРГ" (м. Дніпропетровськ) був проведений аналіз вогнестійкості цих конструкцій за розглянутим вище критерієм 1 – настання граничної температури 500°C. Результатом цього аналізу був висновок про недостатню вогнестійкість несучої колони навісу і рекомендація покрити її вогнезахисною фарбою, що також було зроблено за допомогою моделювання.

У цій роботі наводиться частина результатів аналогічної роботи з аналізу вогнестійкості несучих конструкцій навісу над трибунами іншого стадіону, стадіону НСК «Олімпійський» (м. Київ), але за розглянутим вище критерієм 3 – критерієм втрати стійкості конструкції. Ця частина результатів стосується тільки теплових розрахунків, як основи подальших розрахунків вогнестійкості, що будуть розглянуті в інших публікаціях з причини їх значного обсягу.

Металеві конструкції покриття над трибунами стадіону НСК «Олімпійський» є складними конструкціями з несучих колон та нижніх і верхніх кілець, які з'єднують колони між собою (рис. 1,2). Загальна кількість несучих колон дорівнює 80, кожна з котрих складається з двох частин – нижньої та верхньої (рис.1б), що з'єднуються між собою частинами нижніх та верхніх кілець, (рис. 2). Загальна висота кожної колони становить біля 40 метрів.

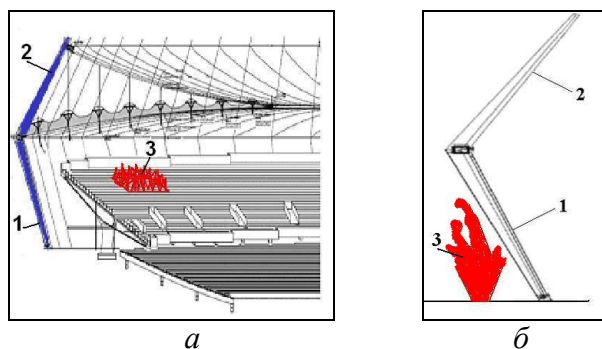


Рис. 1. Загальна схема навісу (а) та окремої металевої колони (б) покриття над трибунами НСК «Олімпійський»: 1 – нижня, 2 – верхня частини колони, 3 – вогнища пожежі

Нижня та верхня частини колони в перерізі мають змінну по висоті ширину (рис.1-2). Колони та кільця мають коробчасту зварену структуру з чисельними перегородками і виготовлені з листової сталі різної товщини (рис.3).

Метою роботи є опис вибраних фізичної і комп'ютерної моделей та результати розрахунку теплового стану несучих металевих конструкцій покриття над трибунами стадіону НСК "Олімпійський" (м. Київ) для подальшого оцінювання їх вогнестійкості при заданих сценаріях реальних пожеж, спричинених горінням стільців для глядачів та пожежею поблизу однієї з колон, що тримає навіс.

Пожежа спричинена горінням стільців для глядачів, які розташовані на трибунах верхнього ярусу стадіону під навісом (рис.1а), або горінням об'єктів, розташованих за трибунами верхнього ярусу поблизу однієї з несучих металевих колон покриття (рис.1б). Згідно з розробленими Українським інститутом пожежної безпеки МНС України та затвердженого у встановленому порядку сценаріями пожежі [5], можливі такі три наступні сценарії розвитку пожежі на НСК «Олімпійський»:

Сценарій 1: стільці для глядачів на площі 7х7 м (рис.1а) загоряються одночасно та вигорять за час, який відповідає швидкості вигорання стільців; вітер з боку футбольного поля відсутній.

Сценарій 2: стільці для глядачів на площі 7х7 м (рис.1а) загоряються одночасно та вигорять за час, який відповідає швидкості вигорання стільців; швидкість вітру з боку футбольного поля дорівнює 5 м/с.

Сценарій 3: загоряється об'єкт, розташований біля колони (рис.1б), та вигорє за час, який відповідає швидкості вигорання його пожежного навантаження; вітер з боку футбольного поля відсутній.

Стільці виготовлені із поліаміду, який є горючим матеріалом. Площа умовного вогнища 3 (рис.1 б) приймається 20 м².

Геометрична модель розрахункової області, що наведена нижче на рис.2, враховує такі особливості:

- достатні розміри об'єму, в якому відбувається пожежа, і конструкції, на які впливає пожежа;
- реальне геометричне розташування і розміри вогнищ пожежі;

- рух вентиляційних потоків, включаючи всі вільні поверхні для вільного руху повітряних мас;
- розподіл температур, швидкостей і тиску в трьох просторових вимірах (тривимірний модель), оскільки розподіл пожежного навантаження носить, як правило, локальний характер.

На рис. 2 представлено вибрану геометричну розрахункову область, яка відповідно до рис. 1 включає нижню та верхню частини колони, кільця, та місця пожеж.

Як видно з рис. 2, вибрана геометрична розрахункова область включає в себе всі частини колон і кільця одночасно, тому розміри області є досить великими - 20,5x28,3x40,4 м.

Така тривимірний геометрична модель є базовою моделлю для моделювання всіх заданих сценаріїв пожежі.

Відповідно до [2-4], розроблені моделі, що використовуються для розрахунків, є нестационарними і враховують радіаційно-конвективний теплообмін в газовому середовищі від джерела теплової дії (джерела пожежі) до поверхні конструкції, кондуктивний теплообмін в конструкції та радіаційно-конвективний теплообмін від конструкції в навколишнє середовище з боку необігріваних поверхонь конструкції.

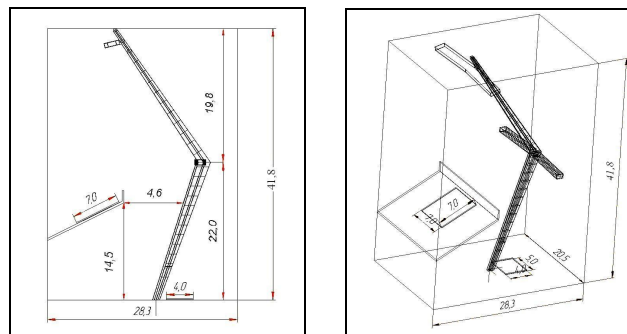


Рис. 2. Геометрія та основні розміри розрахункової області динаміки розвитку пожежі та теплового стану несучих конструкцій навісу над трибунами НСК "Олімпійський".

На рис. 3 представлено типові схеми перерізів нижньої та верхньої колон в середніх по висоті колон та кільця місцях з номерами ліній 1-4, що йдуть перпендикулярно малюнку і вздовж стінок цих колон та кільця. Вдовж цих ліній виводилися розподіли температур, як це показано на рис. 4.

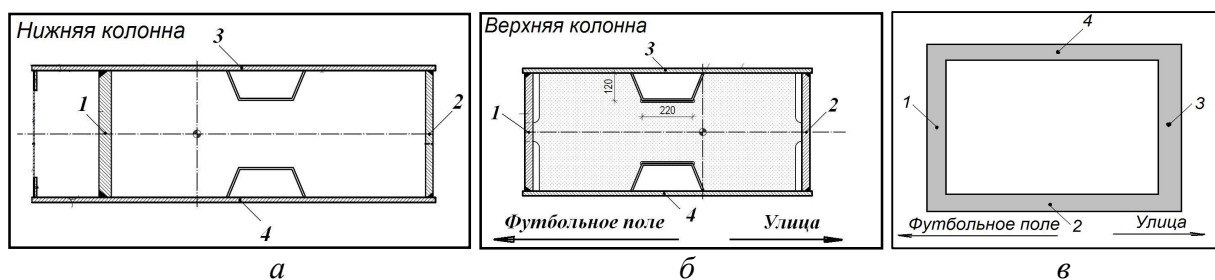


Рис. 3. Переріз нижньої (а) і верхньої (б) колон в середньому по висоті колони місці та верхнього і нижнього кільця (в) навісу з номерами ліній (1-4), що йдуть перпендикулярно малюнку і вдовж яких виводилися розподіли температур

Теплофізичні характеристики газового середовища і металевих конструкцій в моделях задаються у вигляді залежностей від температури. Як початкову температуру конструкції і середовища приймаємо 20⁰ С.

Модель враховує всі основні процеси тепломасообміну в газовому об'ємі між джерелами пожежі та металевими конструкціями, а також:

- швидкість вигорання пожежного навантаження, яка задається як максимальна масова швидкість його вигорання;
- поширення гарячих газів, що виділяються при горінні, вгору і в сторони до металевих конструкцій, нагріваючи їх шляхом вільної конвекції;
- модель вигорання пожежного навантаження приймається при достатній кількості кисню, необхідного для згорання горючих газів, що виділяються;
- теплота згорання і гарячі продукти згорання виділяються в об'ємі і над об'ємом вогнища пожежі протягом часу вигорання пожежного навантаження;
- використовується модель ідеального газу;
- конвективно-радіаційний теплообмін між виділеними вогнищем пожежі і металевими конструкціями гарячими газами враховується за допомогою так званої сумісної постановки задачі, тобто розрахунок теплового стану конструкцій і об'єму гарячих і холодних газів навколо цих конструкцій виконується одночасно, що не потребує задання коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях конструкцій.

Розглянута модель дала змогу проводити розрахунки нестационарних полів температур в заданому об'ємі біля конструкцій, що у свою чергу, дало змогу розрахувати максимальні та середні по поперековому перерізу температури металевих конструкцій (рис.3-5) для подальшої оцінки їх вогнестійкості за вибраними критеріями.

Основні розрахункові рівняння і співвідношення польового методу для моделювання розглянуті в [3]. Розрахунки полів швидкостей, температур і концентрацій під час пожежі проводилися за допомогою програми STAR-CD [6]. Розрахункова сітка моделей мала біля 500 тис. розрахункових контрольних об'ємів.

Розрахунки нестационарних полів температур в конструкціях колон та кілець при різних сценаріях пожеж проводилися на одній моделі (рис.2б). Різниця між моделюванням різних сценаріїв полягала в різному розташуванні вогнищ пожежі (рис.1).

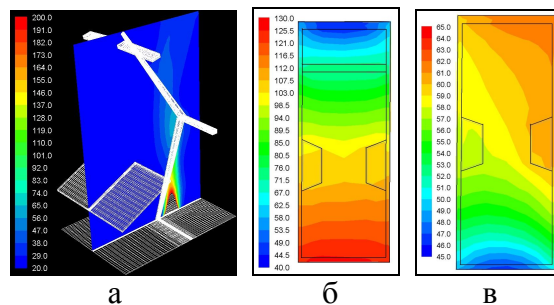


Рис. 3. Поля температур в площині симетрії, що проходить крізь колони, вогнище пожежі і трибуну (а) та в перерізах нижньої (б) і верхньої (в) колон навису в найбільш нагрітих по висоті місцях (сценарій 3, момент часу 150 хв)

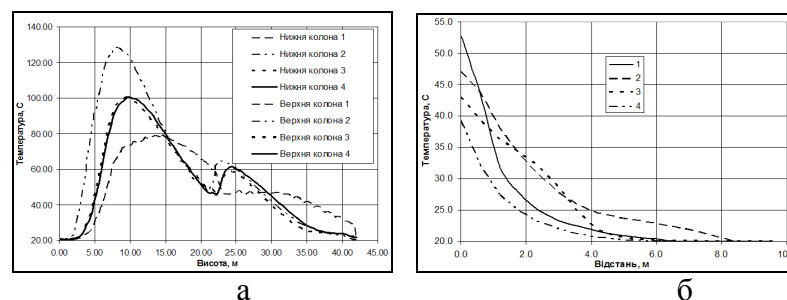


Рис. 4. Розподіли температур вздовж ліній 1-4 (рис.6,7) для верхньої та нижньої колон (а), та вздовж ліній 1-4 (рис.8) для нижніх кілець (б) при дії пожежі в момент часу 150 хв для сценарію пожежі 3.

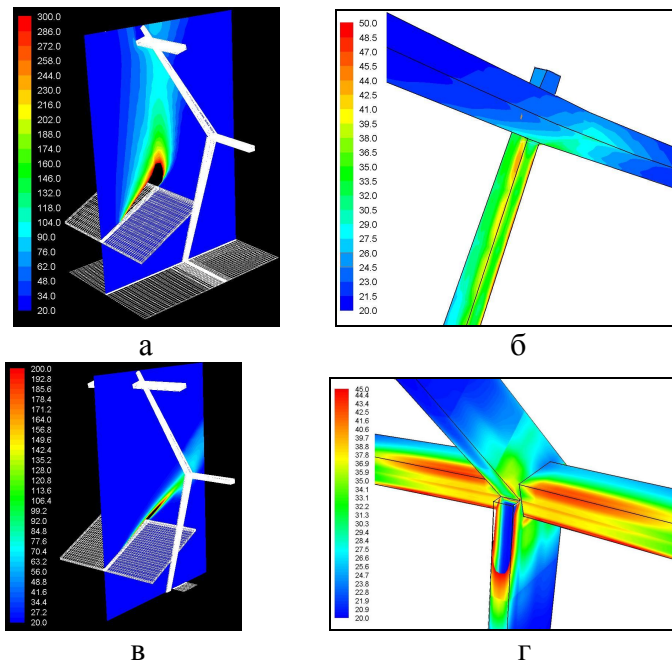


Рис. 5. Поля температур в площині симетрії, що проходить крізь колони, вогнище пожежі та трибуну (а-сценарій 1, в-сценарій 2), та на поверхнях конструкцій у місці з'єднання верхньої колони з верхніми кільцями (б-сценарій 1) та у місці з'єднання верхньої та нижньої колон з нижніми кільцями (г-сценарій 2) при дії пожежі в момент часу 9,24 хв

Таким чином за результатами роботи одержані такі основні результати теплових розрахунків для несучих металевих конструкцій покриття над трибунами стадіону при заданих сценаріях пожежі:

За сценарієм 1, коли протягом 9,24 хв вигорять стільці для глядачів і вітер з боку футбольного поля відсутній, максимальна температура та точка перепаду температур розташовані у верхній частині верхньої колони і становлять 37 °С та 10 °С, відповідно.

За сценарієм 2, коли протягом 9,24 хв вигорять стільці для глядачів і вітер з боку футбольного поля дорівнює 5 м/с, максимальна температура та точка перепаду температур розташовані в місці з'єднання нижньої і верхньої колон та становлять 37 °С та 13 °С, відповідно.

За сценарієм 3, коли протягом 150 хв вигорєє об'єкт, розташований біля нижньої колони, та вітер з боку футбольного поля відсутній, максимальна температура і точка перепаду температур розташовані в середній по висоті частині нижньої колони та становлять 128 °С та 62 °С, відповідно.

Результати розрахунків нестационарних полів температур в конструкціях колон та кілець за реальними умовами пожежі було використано для розрахунків напружень та деформацій при силових навантаженнях металевих конструкцій і надалі для оцінки вогнестійкості конструкцій навісу над трибунами НСК «Олімпійський» (результати будуть наведені в подальших публікаціях), які також були одержані за допомогою сучасних розрахункових методів та комп'ютерних технологій. При цьому критерієм руйнування металевих конструкцій, в яких розглядається зміна температури при пожежі, є досягнення граничних значень напружень в конструкціях, а також втрата стійкості всіх колон, що контролюється і встановлюється в процесі розрахунку.

ВИСНОВКИ

Виконана робота дала змогу одержати такі науково-практичні результати:

1. Розглянуто можливості та особливості застосування розрахункових методів для оцінки вогнестійкості металевих конструкцій великих споруд в умовах реальних пожеж при різних критеріях втрати вогнестійкості.

2. Розроблені та представлені фізична і комп'ютерна моделі та результати розрахунку теплового стану несучих металевих конструкцій покриття над трибунами стадіону НСК "Олімпійський" (м. Київ) для подальшого оцінювання їх вогнестійкості при заданих сценаріях реальних пожеж, спричинених горінням стільців для глядачів та пожежі поблизу однієї з колон, що тримає навіс.

3. Результати теплових розрахунків для несучих металевих конструкцій покриття над трибунами стадіону при заданих сценаріях пожежі показали такі рівні максимальних температур та їх перепадів відносно початкових температур:

За сценарієм 1, коли протягом 9,24 хв вигорять стільці для глядачів і вітер з боку футбольного поля відсутній, максимальна температура та точка перепаду температур розташовані у верхній частині верхньої колони і становлять 37 °С та 10 °С, відповідно.

За сценарієм 2, коли протягом 9,24 хв вигорять стільці для глядачів і вітер з боку футбольного поля дорівнює 5 м/с, максимальна температура та точка перепаду температур розташовані в місці з'єднання нижньої і верхньої колон та становлять 37 °С та 13 °С, відповідно.

За сценарієм 3, коли протягом 150 хв вигорє об'єкт, розташований біля нижньої колони, та вітер з боку футбольного поля відсутній, максимальна температура і точка перепаду температур розташовані в середній по висоті частині нижньої колони та становлять 128 °С та 62 °С відповідно.

4. Одержані результати розрахунків нестационарних полів температур в конструкціях колон та кілець навісу над трибунами НСК «Олімпійський» за реальними умовами пожежі були використані для розрахунків напружень, деформацій і механічної стійкості навісу (розв'язання задач термонапруженого стану і механічної стійкості) і визначення межі вогнестійкості за часом настання втрати стійкості конструкцій і будуть наведені в наступних публікаціях.

Література:

1. **Eurocode 3** part 1.2 (version EN 1993 – 1.2) – Часть 1.2: Общие правила – Проектирование конструкций при воздействии пожара – ноябрь 2005 г.
2. **Общие** требования к расчетным методам определения предела огнестойкости строительных конструкций ДБН В.1.1.-7-2002.
3. **Применение** полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: Методические рекомендации. – М.: ВНИИПО, 2003. – 35 с.
4. **П.Г.Круковский** Использование расчетных методов для оценки огнестойкости металлических конструкций в условиях реальных пожаров // П.Г.Круковский, И.В.Чалая, А.С.Полубинский // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2010. – №22. – С. 15-23.
5. **Сценарії** розвитку пожежі на НСК «Олімпійський».... Український інститут пожежної безпеки МНС України, 6.11.2009 р., 2 с.
6. **STAR-CD** version 3.15, Methodology, CD Adapco Group, Computational Dynamics Limited, 2001.

**АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ
НАВЕСА НАД ТРИБУНАМИ НСК «ОЛИМПИЙСКИЙ» ДЛЯ ОЦЕНКИ
ИХ ОГНЕСТОЙКОСТИ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОГО ПОЖАРА**

Приведены физическая и компьютерная модели и результаты расчета теплового состояния несущих металлических конструкций покрытия над трибунами стадиона НСК "Олимпийский" (г. Киев) для дальнейшей оценки их огнестойкости при заданных сценариях реальных пожаров, вызванных горением стульев для зрителей и пожара вблизи одной из колонн, держащей навес. Использован полевой метод анализа процессов тепломассообмена (поля температур, давлений, скоростей, концентраций) в выбранной трехмерной области расчета и современная компьютерная программа, реализующие численные методы решения полной системы уравнений Навье-Стокса.

Ключевые слова: металлические конструкции, тепловое состояние, реальные условия пожара, огнестойкость, моделирование

P.G. Krukovsky, Chala I.

**ANALYSIS OF CANOPY STEEL STRUCTURES THERMAL STATE OVER
THE STADIUM NSC "OLYMPIC" UNDER REAL FIRE CONDITIONS**

The physical, computer models and calculation results of the thermal state of bearing metal structures covering the NSC "Olympic" (Kyiv) stadium are presented for further fire resistance evaluation for given real fire scenarios caused by burning chairs of spectators and fire under one of the columns bearing the canopy. The field heat transfer processes analysis (temperatures, pressures, velocities and concentrations) for the selected three-dimensional calculation sphere and modern computer program that implements numerical methods of solutions for Navier-Stokes complete system of equations are used.

Key words: steel constructions, thermal state, real fire conditions, fire resistance, modeling.

