

УДК 614.841.332

П.Г. Круковский, д.т.н., проф., ИТТФ НАН Украины, И.В. Чалая,  
Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности

## МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АНАЛИЗА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНЫХ ПОЖАРОВ

Рассмотрена методика (методическое обеспечение), которая является детализацией общих требований ДБН В.1.1.-7-2002, ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010 (ЕВРОКОД 1) и ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 (ЕВРОКОД 3) к применению уточненных (полевых) расчетных моделей для анализа распределения нестационарных температур сложных металлических несущих конструкций крупных сооружений в условиях реальных пожаров для последующей оценки их огнестойкости. Методика иллюстрируется примером расчета теплового состояния несущих металлических конструкций покрытия над трибунами стадиона НСК "Олимпийский" (г. Киев)

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

**Постановка проблемы.** Обеспечение заданной огнестойкости строительных конструкций (колонн, балок и ферм) при пожаре является важной задачей пожарной безопасности [1-2]. Для таких конструкций при их испытании на огнестойкость предельным состоянием является потеря несущей способности. Предел огнестойкости строительных конструкций определяется либо по наступлению предельных значений температур в объеме конструкции, либо по признаку потери несущей способности. Известно, что металлические колонны, балки и фермы, выполненные из конструкционных сталей, теряют свои прочностные свойства в зависимости от уровня нагружения в диапазоне температур 350-500°C. Однако наиболее правильным критерием определения огнестойкости элементов металлических конструкций является критерий потери устойчивости конструкции, что приводит к ее разрушению в условиях пожара.

Стандартом [3] предусмотрены возможность применения экспериментального (путем испытаний) и расчетного методов определения огнестойкости конструкций. Для ряда строительных конструкций экспериментальное определение пределов огнестойкости в огневых печах при стандартном температурном режиме ISO 834 [3] связано с большими затратами или вообще не возможно в виду их больших габаритов. В этом случае наиболее эффективным методом анализа огнестойкости таких конструкций является расчетный или расчетно-экспериментальный методы. При этом применение расчетных методов открывает уникальную возможность учитывать произвольный характер изменения температуры возле исследуемой конструкции и на ее поверхности при сценарии развития реального пожара, который определяется реальными пожарными нагрузками, расстоянием от источника пожара до конструкции и временем огневого воздействия.

ДБН В.1.1.-7-2002 (**Общие требования к расчетным методам определения предела огнестойкости строительных конструкций**) [4], также, как ДСТУ- Н EN 1991-1-2:2010 Еврокод 1. (**ДЕЙСТВИЯ НА КОНСТРУКЦИИ. Часть 1-2. Общие действия. Действия на конструкции при пожаре**) [5] и ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. ЕВРОКОД 3. (**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. Часть 1-2 Общие положения. Расчет конструкций на огнестойкость**) [6] определяют лишь общие требования к расчетным методам определения предела огнестойкости строительных конструкций, не рассматривая деталей методик применения таких методов. Среди задач оценки огнестойкости строительных (в частности металлических) несущих конструкций наиболее сложными для расчетных методов (моделирования) являются задачи, в которых рассматриваются сценарии реальных пожаров.

**Анализ публикаций.** В качестве основных, перечисленных в [4-6], моделей, позволяющих проводить расчеты динамики развития пожара и нагрева строительных конструкций для последующего анализа ее огнестойкости в условиях реальных пожаров, можно перечислить однозонные (интегральные), двухзонные и полевые (CFD- технологии) методы. Более детально эти модели описаны в [7]. Интегральные и двухзонные модели имеют ограниченную область применения из-за использования ряда упрощений и допущений, связанных с необходимостью осреднения температур, скоростей и физических характеристик потоков по всей или разделенной на 2 части (зоны) рассматриваемой газовой среды в помещении или группе помещений с источником пожара. **Эти модели особенно плохо подходят для задач оценки огнестойкости строительных конструкций, температурные поля в которых и возле которых (прилегающие зоны горячих газов) необходимо определять путем моделирования, и совсем не подходят для моделирования пожаров в открытых объемах типа стадионов.**

Полевые модели, методы и технологии, обозначаемые в зарубежной литературе аббревиатурой **CFD** (**C**omputational **F**luid **D**ynamics), лишены этих недостатков и могут быть применены для рассмотрения любого сценария развития пожара.

В [5] такие модели называются «Вычислительные модели термо- и аэродинамики потока», с помощью которых можно рассчитывать системы, учитывая динамику потока, теплообмен и связанные с этим явления через решение фундаментальных уравнений динамики потока. В [6] такие модели называются «Уточненные расчетные модели», которые «...должны обеспечивать реалистичный расчет конструкций, испытывающих огневые воздействия и привести к верному состоянию рассматриваемой части конструктивной системы во время пожара». Однако это определяет лишь общие требования к расчетным методам расчета теплового состояния конструкций, испытывающих огневые воздействия для последующего определения предела их огнестойкости.

Имеется целый ряд компьютерных программ (например, [8-10]), реализующих полевой метод моделирования, которые достаточно точно описывают поля скоростей, температур и концентраций на всех стадиях пожара, а также тепловое состояние исследуемых конструкций произвольной формы и размеров, что позволяет проводить последующую оценку огнестойкости этих конструкций по выбранным критериям.

Однако технология (методика) применения полевого метода моделирования динамики развития реального пожара для оценки огнестойкости конструкций является не простой, требует определенной квалификации и опыта ее пользователей. Поэтому главной проблемой применения полевого метода и реализующих их компьютерных программ является правильность выбранных пользователем моделей и получаемых с их помощью результатов расчета температур анализируемых строительных конструкций.

Вопросу методического описания (обеспечения) построения пользователем моделей и получаемых с их помощью результатов расчета температур анализируемых строительных конструкций с помощью полевых методов в литературе уделяется определенное, но не достаточное внимание, поэтому этот вопрос является актуальным. Например, в [7] кратко изложены сами расчетные методы и их теория, а в [11] обоснование необходимости и краткое изложение методического обеспечения применения полевых методов.

Таким образом, методика применения полевого метода моделирования динамики развития реального пожара и оценки огнестойкости сложных конструкций является актуальной самостоятельной научно - практической задачей, состоящей, в частности, из научно обоснованного выбора сценария пожара, построения физической, математической и компьютерной моделей, их верификации, получения результатов анализа огнестойкости и часто выбора оптимальных мер обеспечения заданной огнестойкости конструкций.

**Целью данной работы** является разработка методики (методического обеспечения) применения уточненных (полевых) расчетных моделей для анализа распределения нестационарных температур сложных металлических несущих конструкций крупных сооружений в условиях реальных пожаров для последующей оценки их огнестойкости.

Под **методическим обеспечением (МО) применения расчетных методов** предлагается подразумевать совокупность организационных и расчетных процедур, позволяющих с максимальной (требуемой) достоверностью определять тепловое состояние и оценить огнестойкость строительных конструкций в условиях воздействия реальных пожаров с учетом особенностей этих конструкций и физических процессов тепломеханического нагружения.

Рассмотрим такое методическое обеспечение на примере 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 пожаром вблизи одной из колонн, которая держит навес (рис.1).

**Описание методического обеспечения и объекта исследования.** Методическое обеспечение (методика) расчета теплового состояния строительных конструкций при заданных сценариях реальных пожаров для дальнейшего оценивания их огнестойкости, по мнению авторов, состоит из следующих основных частей.

1. **Анализ рассматриваемого объекта и особенностей его конструкции.**
2. **Выбор сценариев пожара**
3. **Выбор геометрической области для анализа развития пожара, в которой находятся очаг пожара и рассматриваемые конструкции (области решения задачи тепломассообмена)**
4. **Выбор геометрии рассматриваемых конструкций**
5. **Построение сеточной области для анализа развития пожара**
6. **Выбор физической и математической моделей процессов, происходящих в области анализа развития пожара и рассматриваемых конструкций**
7. **Выбор параметров очага пожара**
8. **Выбор теплофизических параметров газовой среды и рассматриваемых конструкций**
9. **Выбор начальных и граничных условий для и между отдельными частями рассматриваемой системы тел и на границе с окружающей средой**
10. **Выбор программы для реализации выбранных физической и математической моделей рассматриваемой задачи моделирования**
11. **Выбор метода численного интегрирования математической моделей в рамках выбранной программы**
12. **Проведение решения задачи**
13. **Визуализация и анализ полученных результатов**
14. **Верификация разработанной модели и проверка полученных результатов**
15. **Подготовка результатов для оценки огнестойкости рассматриваемых конструкций**
16. **Оценка огнестойкости рассматриваемых конструкций по заданным критериям**
17. **Выбор мероприятий для обеспечения заданной огнестойкости рассматриваемых конструкций**

Рассмотрим методику по пунктам на примере расчета теплового состояния конструкций покрытия над трибунами стадиона НСК "Олимпийский" (рис.1). При изложении каждого пункта методики курсивом будет идти краткое пояснение особенностей этого пункта, а затем иллюстрация его применения на примере расчета теплового состояния конструкций покрытия над трибунами стадиона НСК "Олимпийский".

1. **Анализ рассматриваемого объекта и особенностей его конструкций.** Тут необходимо понять назначение объекта моделирования и особенности (формы, основные размеры, структура) строительных конструкций, тепловое состояние которых необходимо определять.

Для рассматриваемого примера рассматриваются металлические конструкции навеса над трибунами стадиона НСК «Олимпийский», которые являются сложным сооружением, состоящим из несущих колонн, каждая из которых состоит из двух частей - нижней 1 и верхней 2, которые соединяются между собой частями нижних 3 и верхних 4 колец (рис.1). Общее количество несущих колонн 80, высота каждой колонны составляет около 40 метров.

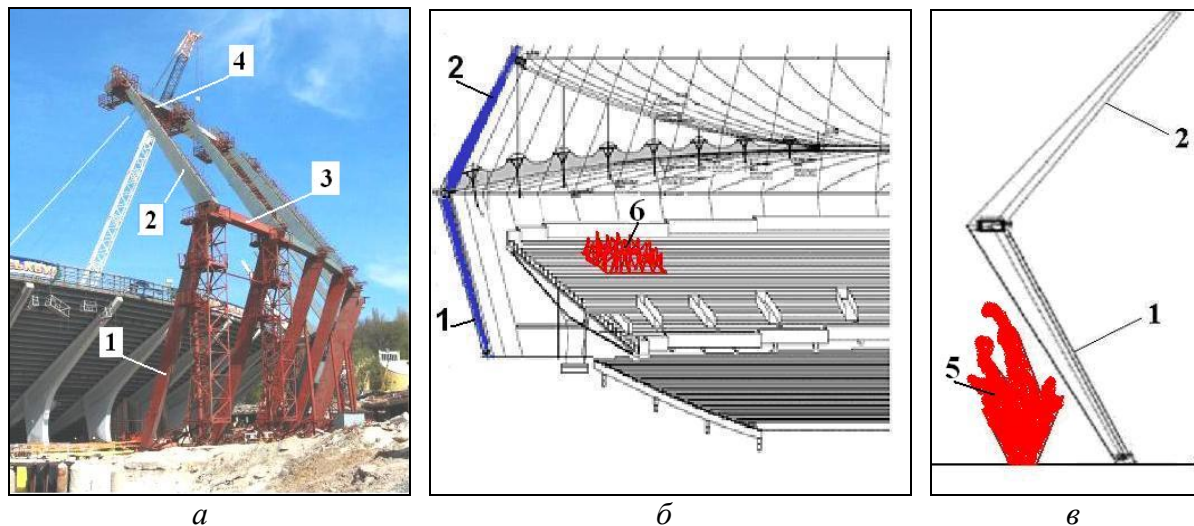


Рисунок 1 – Фото строящихся колонн (а), общая схемы покрытия (б) и отдельная несущая металлическая колонна навеса (в) над трибунами НСК «Олимпийский». 1 – нижняя, 2 – верхняя части колонн, 3 – нижняя, 4 – верхняя части колец, 5 – очаг пожара под колонной, 6 – очаг пожара на верхнем ярусе трибуны.

Колонны (рис.1,а) с переменными по высоте сечениями и кольца имеют коробчатую сварную структуру с многочисленными перегородками и изготовлены из листовой стали различной толщины (рис.2,3).

**2. Выбор сценариев пожара.** Очень важный этап, который должен быть тщательно продуман, согласован с заказчиком и органом государственного пожарного надзора. При выборе сценариев следует определить расположение очагов пожара и учесть возможные (особенно наиболее неблагоприятные) схемы движения воздушных потоков, - вентиляционных потоков или потоков через открытые проемы (пожары в помещениях) или направление и сила ветра (пожары на открытом воздухе).

Для рассматриваемого примера сценарии пожара были разработаны Украинским институтом гражданской защиты [12] и утвержден органом госпожнадзора, согласно которым пожар вызван горением стульев для зрителей, расположенных на трибунах верхнего яруса стадиона под навесом (рис.1,б), или горением объектов, расположенных за трибунами верхнего яруса вблизи одной из несущих металлических колонн покрытия (рис.1,в). Рассматриваются следующие три сценария развития пожара на НСК «Олимпийский»:

**Сценарий 1:** стулья для зрителей на площади 7×7 м (рис.1,б) загораются одновременно и выгорают за время, которое соответствует скорости выгорания стульев, ветер со стороны футбольного поля отсутствует.

**Сценарий 2:** стулья для зрителей на площади 7×7 м (рис.1,б) загораются одновременно и выгорают за время, которое соответствует скорости выгорания стульев, скорость ветра со стороны футбольного поля равна 5 м/с.

**Сценарий 3:** загорается объект, расположенный у колонны (рис.1,в), и выгорает за время, которое соответствует скорости выгорания его пожарной нагрузки, ветер со стороны футбольного поля отсутствует.

Стулья изготовлены из полиамида, который является горючим материалом. Площадь условного очага 6 (рис.1,б) принимается равной 49 м<sup>2</sup>. Площадь условного очага пожара 5 (рис.1,в) принималась 20 м<sup>2</sup>.

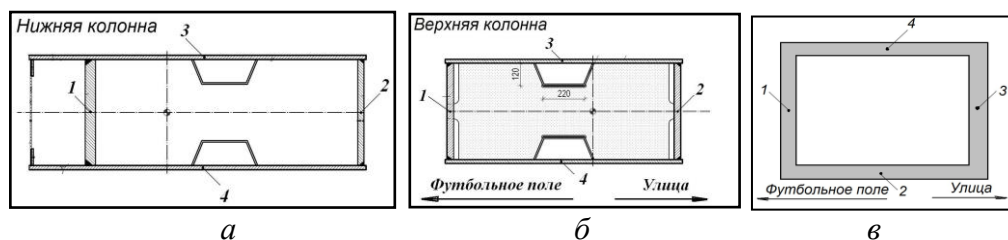


Рисунок 2 – Средние по высоте сечения с перегородками для нижней (а) и верхней (б) колонн, а также верхнего и нижнего колец (в) навеса с номерами линий (1-4), идущих перпендикулярно рисунку, вдоль которых выводились распределения температур.

**3. Выбор геометрической области для анализа развития пожара,** в которой находятся очаг пожара и рассматриваемые конструкции. На этом этапе построения модели необходимо прежде всего определиться какая это должна быть область для анализа. Она может быть двухмерная (очень редко и требует серьезного обоснования), а в основном должна быть трехмерная. Необходимо также правильно выделить объем, в котором находятся очаг пожара, газовая среда, через которую передается тепловое воздействие от очага пожара к рассматриваемым конструкциям, и сами конструкции. Границы области должны быть такими, чтобы обеспечить естественное (не стесненное) движение воздушной среды с горячими газами от очага пожара к рассматриваемым конструкциям в выбранных помещениях (пожары в помещениях) или при пожарах на открытом воздухе.

Для рассматриваемого примера геометрические размеры расчетной области приведены на рис.3 и учитывают следующие особенности:

- 1) достаточно большие размеры расчетной области, в которой происходит пожар, и размер конструкций, на которые воздействует пожар;
- 2) размеры выбранной области обеспечивают естественное (не стесненное) движение воздушной среды с горячими газами от очага пожара к рассматриваемым конструкциям;
- 3) учитывается реальное расположение и геометрические размеры очагов пожара, размеры которых в 4-5 раз больше расчетной области в горизонтальной плоскости;
- 4) выбрана трехмерная модель для анализа распределения температур, скоростей и давлений во всех пространственных направлениях, поскольку распределение пожарной нагрузки и рассматриваемых конструкций произвольно в пространстве.

Расчетная область решения (рис.3) имеет размеры 20,5 × 28,3 × 41,8 м и включает в себя нижнюю и верхнюю части колонн, части колец, часть трибуны верхнего яруса и места расположения очагов пожара на трибуне верхнего яруса и под нижней колонной.

**4. Выбор геометрии рассматриваемых конструкций.** Тут предлагается уточнить размеры и структуру строительных конструкций, тепловое состояние которых необходимо определять. Наиболее правильно форму и размеры конструкций представлять в модели без упрощений, а возможные изменения обосновывать.

Для рассматриваемого примера рассматриваемыми строительными конструкциями являются нижняя и верхняя части колонн, а также нижняя и верхняя части колец навеса (рис.1-3). Колонны (рис.1,а) с переменными по высоте сечениями и кольца имеют коробчатую сварную структуру с многочисленными (12-15 шт.) перегородками и изготовлены из листовой стали различной толщины (рис.2,3).

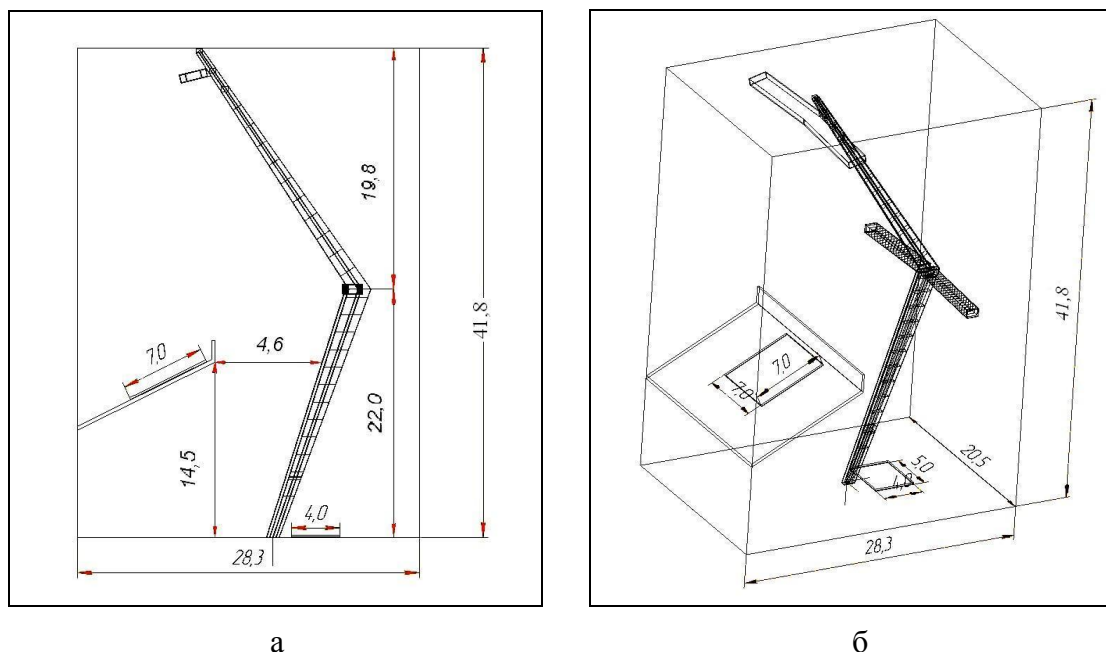


Рисунок 3 – Геометрия и основные размеры (в метрах) трехмерной расчетной области решения (а-среднее плоское сечение, б-трехмерный вид) для анализа динамики развития пожара и теплового состояния несущих конструкций навеса над трибунами НСК "Олимпийский".

**5. Построение сеточной области для анализа развития пожара.** Поскольку решение сложных задач моделирования термогазодинамических процессов при реальных пожарах возможно только современными численными методами, то для реализации этих методов необходимо строить сеточную область в выбранной геометрической области для анализа динамики развития пожара и огнестойкости конструкций. Расчетная сетка должна достаточно хорошо представлять все особенности геометрической области и рассматриваемых конструкций. Сетка должна быть сгущена в местах, где имеются наибольшие градиенты температур и скоростей, и может быть разрежена в местах малых и средних градиентов температур и скоростей, вследствие чего она, как правило, является неравномерной по объему геометрической области для анализа развития пожара, в которой находятся очаг пожара и рассматриваемые конструкции. Следует отметить, что визуализация всей расчетной сетки для трехмерных моделей представляет определенную трудность, поэтому, как правило, ее выводят для контроля по частям модели.

Для рассматриваемого примера расчетная сетка модели имела около 0,5 млн. расчетных объемов. На рис. 4,а приведена визуализация частей расчетной сетки для трибуны, несущих конструкций навеса над трибунами (с детализацией внутренней части колоны слева вверху).

**6. Выбор физической и математической моделей** процессов, происходящих в области анализа развития пожара и рассматриваемых конструкций. Тут следует четко представить словесное описание рассматриваемых физических процессов и допущений, которые будут приниматься и которые позволят с наибольшей достоверностью моделировать процессы выгорания пожарной нагрузки, передачи теплового воздействия на рассматриваемые конструкции и тепловое состояние конструкций для оценки их огнестойкости. Математическая модель, реализующая выбранную физическую модель, представляет собой полную систему трехмерных нестационарных, нелинейных уравнений Навье-Стокса с  $k-\epsilon$  моделью турбулентности или моделью крупных вихрей Смагоринского. Основные уравнения и соотношения полевого метода рассмотрены в [7].

Для рассматриваемого примера разработанная модель, используемая для расчетов, является нестационарной, учитывает радиационно - конвективный теплообмен в газовой



среде от источника теплового воздействия (очага пожара) к поверхности конструкции, кондуктивный теплообмен в конструкции и радиационно - конвективный теплообмен от конструкции в окружающую среду.

Теплофизические характеристики газовой среды и металлических конструкций в моделях задаются в виде зависимостей от температуры.

Модель учитывает пожар в газовом объеме между источниками пожара и металлическими конструкциями, и также:

- Скорость выгорания пожарной нагрузки, которое задается как максимальная массовая скорость выгорания пожарной нагрузки.
- Подъем горячих газов, образующихся при горении, вверх и к металлическим конструкциям, нагревая их путем свободной конвекции.
- Модель выгорания пожарной нагрузки принимается при достаточном количестве кислорода, необходимого для сгорания горючих газов, выделяемых.
- Теплота сгорания и горячие продукты сгорания выделяются в объеме над объемом очага пожара в течение времени полного выгорания пожарной нагрузки. Время выгорания пожарной нагрузки рассчитывается.
- Используется модель идеального газа.
- Конвективно-радиационный теплообмен между горячими газами, поднимающимися от очага пожара к металлическими конструкциями учитывается с помощью, так называемой, сопряженной постановки задачи, то есть расчет теплового состояния конструкций и объема горячих и холодных газов вокруг этих конструкций выполняется одновременно и не требует задания коэффициентов теплоотдачи на поверхностях конструкций.

Таким образом, рассматриваемая модель должна обеспечить проведение расчетов нестационарных полей температур в газовом объеме около конструкций, что в свою очередь позволит рассчитать локальные, максимальные и средние по поперечному сечению металлических конструкций температуры для оценки их огнестойкости по выбранным критериям.

**7. Выбор параметров очага пожара.** Среди параметров очага пожара в простой модели выгорания следуют такие параметры, как площадь очага, удельная пожарная нагрузка, скорость ее выгорания, которая задается (как правило, максимальная массовая скорость выгорания) и теплота сгорания пожарной нагрузки. В более сложных моделях выгорания пожарной нагрузки задаются тип и вид химических реакций горения веществ очага пожара, что порождает учет дополнительных уравнений в математической модели для расчета полей концентраций исходных веществ очага пожара и продуктов сгорания этих веществ.

Для рассматриваемого примера в сценариях пожара 1 и 2 стулья для зрителей на трибуне выгорают на площади  $7 \times 7$  м (рис.1,б), загораются одновременно и выгорают за время 9,24 мин., которое соответствует скорости выгорания стульев. Величина пожарной нагрузки составляет  $4,658 \text{ кг/м}^2$ , теплота сгорания пожарной нагрузки составляет  $29,16 \text{ Мдж/кг}$ , максимальная массовая скорость выгорания пожарной нагрузки составляет  $0,0083 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ .

Удельная пожарная нагрузка объекта, расположенного под колонной (рис.1,в. сценарий пожара 3), принимается  $1389 \text{ Мдж/м}^2$ , что в пересчете на эквивалент древесины с теплотой сгорания  $18,4 \text{ Мдж/кг}$  составляет  $75 \text{ кг/м}^2$ . Площадь условного очага принимается  $20 \text{ м}^2$ , массовая скорость выгорания пожарной нагрузки (древесины) составляет  $8,33 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$  [13].

**8. Выбор теплофизических параметров** газовой среды и рассматриваемых конструкций.

Теплофизические характеристики газовой среды и металлических конструкций в моделях задаются в виде зависимостей от температуры. Теплофизические характеристики газовой среды (воздуха) заданы в используемых программах, а металлических конструкций необходимо брать из Еврокодов [5-6].

**9. Выбор начальных и граничных условий.** Начальная температура конструкций и газовой среды принимается температуре окружающей конструкции среде. Конвективно-радиационный теплообмен между горячими газами, поднимающимися от очага пожара к металлическими конструкциями учитывается с помощью, так называемой, сопряженной постановки задачи, то есть расчет теплового состояния конструкций и объема горячих и холодных газов вокруг этих конструкций выполняется одновременно и не требует задания коэффициентов теплоотдачи на поверхностях конструкций. Граничные условия на границе геометрической области (газовой среды) для анализа развития пожара, в которой находятся очаг пожара и рассматриваемые конструкции, задается в виде давления, температуры и плотности окружающей среды.

В рассматриваемом примере начальная температура конструкций и среды принималась 20 °С.

**10. Выбор программы для реализации выбранных физической и математической моделей** рассматриваемой задачи моделирования. Имеется целый ряд компьютерных программ (например [9-11]), реализующих полевой метод моделирования, которые достаточно точно описывают поля давлений, скоростей, температур и концентраций на всех стадиях пожара, а также тепловое состояние исследуемых конструкций произвольной формы и размеров, что позволяет проводить последующую оценку огнестойкости этих конструкций по выбранным критериям. Необходимо заметить, что имеющиеся готовые программы, реализующие полевой метод моделирования, настолько сложные и трудоемкие, что создавать свою собственную программу практически не возможно и намного более рациональным является освоение существующих программ, которые вбирают в себя современные модели термогазодинамики и термонапряженного состояния, а также численные методы их реализации и компьютерные возможности удобного построения моделей, ввода исходных данных и визуализации получаемых результатов моделирования.

Для рассматриваемого примера расчеты полей скоростей, температур и концентраций при пожаре проводились с помощью программы ANSYS FLUENT [10]. Расчетная сетка модели имела около 0,5 млн. расчетных контрольных объемов.

**11. Выбор метода численного интегрирования математической моделей** в рамках выбранной программы. В каждой из существующих программ реализовано определенное количество методов численного интегрирования выбранной математической модели, ориентированных на те или иные особенности моделируемых физических процессов, которые выбираются в п.6. Эти методы представлены в виде так называемых решателей.

Для рассматриваемого примера в соответствии с выбранной физической моделью (п.6) необходимо выбирать решатель, учитывающий особенности свободно конвективного теплообмена от очага пожара к рассматриваемым строительным конструкциям.

**12. Проведение решения задачи.** При выполнении решения следует обратить особое внимание на обеспечение сходимости получаемого решения, что в свою очередь обеспечивает правильное решение нелинейной системы уравнений, описывающих моделируемые физические процессы.

**13. Визуализация и анализ полученных результатов.** В существующих программах реализованы возможности визуализации полей давлений, скоростей, температур и концентраций на всех стадиях пожара, а также тепловое состояние (поля температур) исследуемых конструкций произвольной формы и размеров, что позволяет проводить последующую оценку огнестойкости этих конструкций по выбранным критериям.

Для рассматриваемого примера выбранная модель позволила провести расчет нестационарных полей температур в объеме около рассматриваемых конструкций, который в свою очередь позволил рассчитать локальные, максимальные и средние по поперечному сечению температуры металлических конструкций (рис.4-5) для последующей (не вошедшей в эту работу) оценки их огнестойкости по выбранным критериям.

На рис. 4,б приведены поля температур в газовом пространстве в плоскости симметрии, проходящей через колонны, очаг пожара и трибуну и на поверхностях



конструкцій в місці з'єднання верхньої і нижньої колонн з нижніми кільцями (рис.5,а) для сценарія 2 при впливі пожеги в кінцевий момент часу 9,24 мин. Аналіз наведених результатів показав, що за цим сценарієм, коли за час 9,24 мин. вигорають ступінь для глядачів і вітер з боку футбольного поля дорівнює 5 м/с, максимальна температура і перепад температур розташовані в місці з'єднання нижньої і верхньої колонн і становлять 37 °С і 13 °С, відповідно.

На рис.4,в наведені результати розрахунку полів температур в конструкції колонни в кінцевий момент часу вигорання пожежної навантаження під колонною для сценарія 3 в момент часу 150 мин. Необхідне для аналізу огнестійкості розподілення температури на поверхнях нижньої (відмітки 0-21 м) і верхньої (відмітки 21-42 м) колонн в найбільш нагрітих по висоті місцях в кінцевий момент часу вигорання пожежної навантаження 150 мин. наведено на рис.5,в. Найбільш нагріті місця на нижній колонні знаходяться на її частині, зверненій на вулицю (від футбольного поля, рис. 5,б і 5,в), а на верхній колонні – на частині, зверненій до футбольного поля. Єстественно, що обидві ці частини знаходяться на вертикалі вогнища пожеги на висоті приблизно 8 і 23 м, де піднімаються найбільш гарячі гази. Таким чином, за сценарієм пожеги, коли протягом 150 мин. вигорає об'єкт, розташований під нижньою колонною, і вітер з боку футбольного поля присутній, максимальна температура розташована в середній по висоті частині нижньої колонни і становлять 128°С.

Результати розрахунків полів температур в конструкціях колонн і кілець за умов реального пожеги були використані для розрахунків напружень і деформацій за силової навантаження металевих конструкцій і в подальшому для оцінки огнестійкості конструкцій навісу над трибунами НСК «Олімпійський». В цій статті ці результати не приводяться.

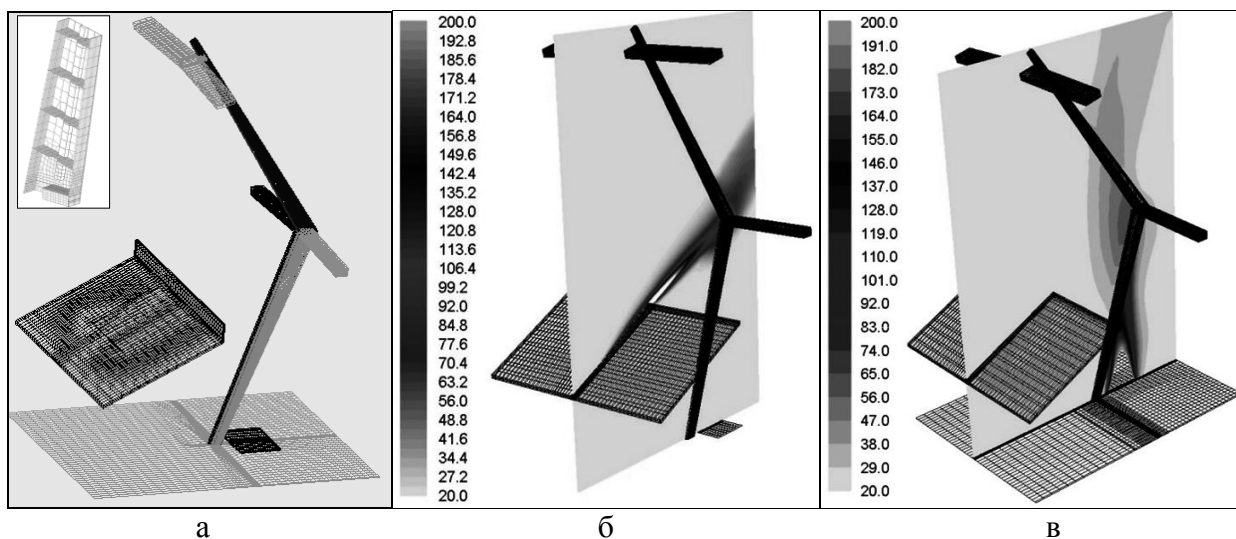


Рисунок 4 – Части расчетной сетки для трибуны, несущих конструкций навеса над трибунами (с детализацией внутренней части колонны слева вверху) и поверхностей очагов пожара (а), а также распределение температур в газовой среде в плоскости симметрии, проходящей через колонну, очаг пожара и трибуну в момент времени 150 мин. для сценариев пожара 2 (б) и 3 (в).

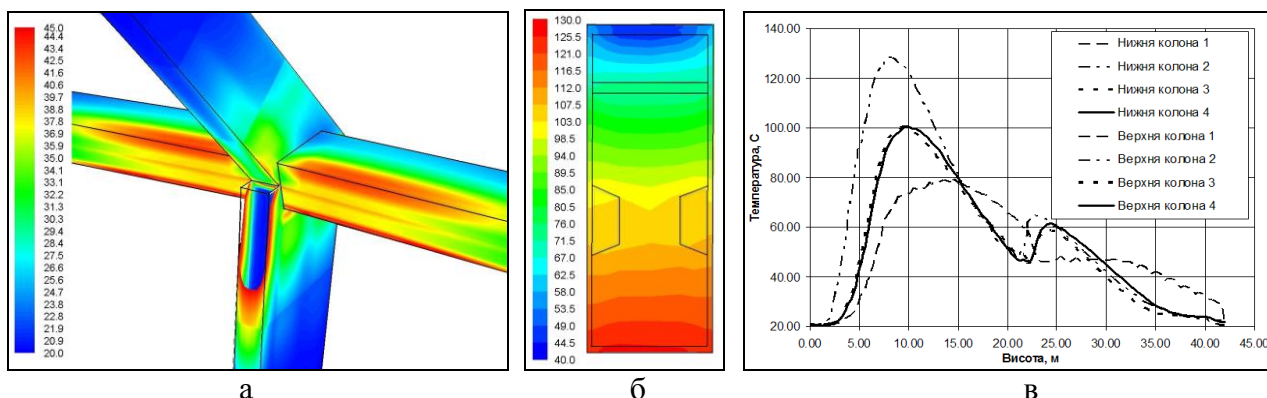


Рисунок 5 – Поле температур на поверхностях конструкций в месте соединения верхней и нижней колонн с нижними кольцами при воздействии пожара в момент времени 150 мин. для сценария 2 (а), в сечении нижней колонны (б) для сценария 3 и распределение температур по высоте нижней и верхней колонн вдоль линий 1-4 (в) для сценария 3, обозначенных на рис. 2.

#### 14. Верификация разработанной модели и проверка полученных результатов.

При выполнении решения следует обратить особое внимание на достоверность получаемого распределения температур в рассматриваемых конструкциях, что в свою очередь обеспечивает правильное определение огнестойкости этих конструкций. Достоверность получаемого распределения температур можно проверять такими способами, как проверка балансов теплоты, выходящей из очага пожара в газовое пространство и поглощаемого этим пространством и конструкциями, а также уходящего в окружающую среду. Одним из способов верификации модели является способ сравнения результатов расчета, полученные с помощью других моделей и компьютерных программ, реализующих полевой метод, кратко описанный ниже и в работах [14,15]. Конечно, наиболее точным методом верификации моделей является сравнение полученных результатов с результатами измерений температур исследуемых конструкций при реальных огневых испытаний, что рекомендуется стандартами [4-6]. Однако это не всегда возможно ввиду уникальности, масштабности и сложности как рассматриваемых конструкций, так и сценариев реальных пожаров.

Рассмотренный пример как раз и является таким масштабным и сложным сооружением. Характер изменения температуры на поверхностях нижней и верхней колонн в наиболее нагретых по высоте местах носит сложный характер (рис.5) и зависит от правильности выбора достаточно сложных физической и компьютерной моделей, а также правильности задания многих параметров этих моделей, часть из которых рассмотрена выше. Естественно возникает вопрос проверки достоверности результатов, полученных с помощью программы ANSYS FLUENT, часть из которых представлена на рис.4,5. Поэтому, как отмечалось выше, способ сравнения с результатами, полученными с помощью других моделей и компьютерных программ, реализующих полевой метод, является более доступным по сравнению с экспериментальной проверкой этих результатов. Для такого сравнения была выбрана программа FDS [10], в среде которой была воспроизведена модель, аналогичная модели в программе FLUENT. В работе [14] приведены результаты расчета полей температур в конструкциях колонн в конечный момент времени выгорания пожарной нагрузки под колонной в момент времени 150 мин., полученных с помощью этих программ. Сравнение этих полей и зависимостей температур по высоте показало их удовлетворительную качественную и количественную близость, что подтверждает достоверность полученных результатов моделирования.

Поэтому можно сказать, что способ сравнения с результатами, полученными с помощью других моделей и компьютерных программ, реализующих полевой метод, является более доступным, но также не простым, т.к. необходимо квалифицированно применять эти другие программы. При применении других программ для верификации результатов моделирования возможна кооперация пользователей разных программ, однако следует

помнить, что создание и отладка сложных моделей реальных строительных конструкций является весьма трудоемкой и продолжительной работой, особенно для конструкций стадионов, чему посвящена данная работа. Примером такой работы является также моделирование динамики развития пожара и анализа огнестойкости несущих металлических конструкций навеса над трибунами стадиона «МЕТАЛЛУРГ» (г. Днепропетровск) в условиях пожара под этими конструкциями, вызванного выгоранием зрительских кресел [11].

**15. Подготовка результатов для оценки огнестойкости рассматриваемых конструкций.** Этот этап является важным при переходе к оценке огнестойкости рассматриваемых конструкций, если такая оценка проводится с помощью других программ. При выполнении этого этапа результаты передаются в виде рис. 4-5, а также табличных значений.

**16. Оценка огнестойкости рассматриваемых конструкций по заданным критериям.** При использовании расчетных методов (методов математического моделирования), объем и сложность работ по определению предела огнестойкости строительных конструкций существенно увеличиваются в такой последовательности:

1. Если рассчитывать только поля температур в металлическом элементе конструкции (решение задачи теплопроводности) и определять огнестойкость элемента конструкции по времени наступления предельной температуры (например 500°C), - используется критерий наступления предельной температуры;

2. Если рассчитывать поля температур, напряжений и деформаций в металлическом элементе конструкции (решение задач термонапряженного состояния) и определять границы огнестойкости элемента по времени наступления потери его несущей способности (разрушения), - используется критерий потери его несущей способности;

3. Если рассчитывать поля температур, напряжений, деформаций и механическую устойчивость металлического элемента и всей конструкции, в которую он входит, (решение задач термонапряженного состояния и механической устойчивости) и определять предел огнестойкости элемента и всей металлической конструкции по времени наступления потери устойчивости, что также приводит к ее разрушению, - используется критерий потери устойчивости конструкции. Здесь устойчивостью конструкции, состоящей из ряда элементов, считаем ее способность сохранять свои форму, геометрические размеры, целостность и функциональное назначение при термомеханических деформациях одного или нескольких элементов конструкции вследствие нагрева под действием повышенной температуры.

Могут быть рассмотрены случаи анализа огнестойкости по различным критериям наступления предельного состояния элемента конструкции или всей конструкции, которые показывают, что расчет их теплового состояния при воздействии повышенной температуры является основным этапом анализа огнестойкости металлических конструкций, а потеря их огнестойкости в зависимости от конструктивной сложности может происходить при различных уровнях температуры - от нескольких десятков и сотен градусов до температур выше 500°C.

В рассмотренном примере результаты расчетов полей температур в конструкциях колонн и колец при условиях реального пожара были использованы для расчетов напряжений и деформаций при силовых нагрузках металлических конструкций и в дальнейшем для оценки огнестойкости всей (состоящей из 80-и колонн с кольцами) конструкции навеса над трибунами НСК «Олимпийский». При этом использовался критерий времени наступления потери устойчивости всей конструкции навеса. Ввиду ограниченности объема статьи эти результаты не приводятся.

**17. Выбор мероприятий для обеспечения заданной огнестойкости рассматриваемых конструкций.** После выполнения оценки огнестойкости рассматриваемых конструкций могут возникать вопросы обеспечения заданной огнестойкости путем применения различных мероприятий. В работе [11] таким

мероприятием было применение огневой защиты колонны путем ее обмазки огнезащитным веществом.

В рассмотренном примере оценка огнестойкости всей конструкции навеса над трибунами НСК «Олимпийский» показала, что конструкция навеса обладает необходимой огнестойкостью при всех сценариях пожара и никаких дополнительных мер не требуется. Такой вывод является далеко не очевидным без проделанных расчетов, которые необходимо проводить для всех ответственных объектов, особенно для стадионов.

Таким образом, как видно из приведенного выше, технология применения полевого метода моделирования динамики развития реального пожара и расчета теплового состояния конструкций для оценки ее огнестойкости является не простой и требует определенной квалификации и опыта специалистов в области моделирования, а также четкого выполнения определенных правил и требований ее применения. Общие требования применения и проверки расчетных методов для оценки огнестойкости конструкций приведены в [4-6], а предложение по разработке специального методического обеспечения использования полевого метода приведено выше.

Рассмотренное выше методическое обеспечение расчета теплового состояния конструкций сооружений в условиях реальных пожаров при применении полевого метода может быть основой для уточнения требований к расчетным методам, изложенным в ДБН В.1.1.-7-2002, а также основой (схемой) для разработки методики расчета огнестойкости конструкций, которую в соответствии с ДБН В.1.1.-7-2002 требуется утверждать в органах госпожнадзора.

#### **Выводы:**

1. На основе обзора современных расчетных методов анализа развития пожаров и их воздействия на строительные конструкции показано, что CFD - технологии, основанные на использовании полевых моделей, являются наиболее подходящими для оценки огнестойкости таких конструкций в условиях воздействия реальных пожаров.

2. Изложена достаточно подробная методика (методическое обеспечение) применения уточненных (полевых) расчетных моделей для анализа распределения нестационарных температур сложных металлических несущих конструкций крупных сооружений в условиях реальных пожаров для последующей оценки их огнестойкости.

3. Разработанное методическое обеспечение является детализацией общих требований к расчетным методам, изложенным в ДБН В.1.1.-7-2002, ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010 (ЕВРОКОД 1) и ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 (ЕВРОКОД 3), и может быть полезным для лиц, использующих расчетные модели и методы для анализа распределения нестационарных температур сложных несущих конструкций в условиях реальных пожаров для последующей оценки их огнестойкости.

4. Методика иллюстрируется примером расчета теплового состояния несущих металлических конструкций покрытия над трибунами стадиона НСК "Олимпийский" (г. Киев) при различных сценариях реальных пожаров, вызванных горением стульев для зрителей и пожаром вблизи одной из колонн, которая держит навес.

5. Не смотря на то, что рассмотренный расчетный метод является сложным и трудоемким, он часто является единственным способом расчета распределения нестационарных температур сложных несущих конструкций для оценки их огнестойкости.

6. Рассмотренное выше методическое обеспечение расчета теплового состояния конструкций сооружений в условиях реальных пожаров при применении полевого метода может быть основой для уточнения требований к расчетным методам, которые изложены в ДБН В.1.1.-7-2002, а также основой (схемой) для разработки методики расчета огнестойкости конструкций, которую в соответствии с ДБН В.1.1.-7-2002 требуется утверждать в органах госпожнадзора.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Предупреждение дефектов в строительстве. Защита материалов и конструкций / А. Грасник, Э. Грюн, В. Фикс, в. Хольцапфель, Х. Ротер. Пер. с англ. – 1981. – 184 с.
2. Рекомендации по обследованию зданий и сооружений, поврежденных пожаром. – М.: Стройиздат, 1987. – 80 с.
3. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования : ГОСТ 30247.0-94. – [Введен в действие 1995-03-23]. – М. : Изд-во стандартов, 1994. – 15 с.
4. Общие требования к расчетным методам определения предела огнестойкости строительных конструкций ДБН В.1.1.-7-2002.
5. ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010. ЕВРОКОД 1. ДЕЙСТВИЯ НА КОНСТРУКЦИИ. Часть 1-2. Общие действия. Действия на конструкции при пожаре.
6. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. ЕВРОКОД 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. Часть 1-2 Общие положения. Расчет конструкций на огнестойкость.
7. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: Методические рекомендации. – М.: ВНИИПО, 2003. – 35 с.
8. STAR-CD version 3.15, Methodology, CD Adapco Group, Computational Dynamics Limited, 2001.
9. ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation. <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/index.htm>
10. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide - NIST Special Publication 1018–5–July 30, 2008.
11. П.Г.Круковский, И.В.Чалая, А.С. Полубинский. Использование расчетных методов для оценки огнестойкости металлических конструкций в условиях реальных пожаров // Науковий вісник УкрНДПБ. – 2010. – №22. – С. 15–23.
12. Сценарії розвитку пожежі на НСК «Олімпійський». Український інститут пожежної безпеки МНС України, 6.11.2009 р., 2 с.
13. Пожаровзрывобезопасность веществ, материалов и средств их тушения. Справ. Кн.1/ Баратов А.Н. и др., – М., Химия, 1990, – 496 с.
14. Круковский П.Г., Чалая И.В., Перепелица М.С. Анализ теплового состояния металлических колонн стадиона НСК «Олимпийский» при воздействии реального пожара (вопросы верификации) // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2013. – № 13. – С. 53-59.
15. Круковський П.Г., Чала І.В. Аналіз теплового стану металевих конструкцій навісу над трибунами НСК «Олімпійський» для оцінювання їх вогнестійкості в умовах реальних пожеж // Збірник наукових праць ЛДУБЖД "Пожежна безпека". – 2013. – № 22. – С. 140-149.