

УДК69.036.3

Гапонова Л. В., к.т.н., доц., Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, г. Харьков
Резник П. А., к.т.н., ст. преп., Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, г. Харьков
Гребенчук С. С., г. Харьков

ОЦЕНКА ОГНЕСТОЙКОСТИ КОНСТРУКТИВНО-АНИЗОТРОПНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ

Выполнена оценка огнестойкости конструктивно-анизотропной железобетонной плиты архитектурно-строительной системы «Монофант». На основании результатов численного эксперимента, моделирующего работу конструкции при одностороннем нагреве по режиму стандартного пожара получены температурные поля для 30, 60, 90, 120, 180 и 240 мин. При анализе численного эксперимента поведения конструкции при воздействии на нее стандартного пожара построена трехмерная КЭ модель конструктивной системы, позволяющая решать температурную задачу в нестационарных условиях. Расчеты выполнялись в среде ПК «ANSYS».

Рассмотрено 2 типа сечений плит перекрытия высотой 300 мм и 500 мм. В обоих случаях толщина обшивки составляла 50 мм. Ширина ребер 150 мм, шаг ребер для плиты перекрытия высотой 300 мм – 1000 мм, а для плиты 500 мм – 500 мм. В качестве утеплителя при расчете температур рассматривался огнеупорный экструдированный пенополистирол. Получено распределение температуры по высоте сечения для обоих вариантов как по бетонному сечению, так и по утеплителю.

Ключевые слова: огнестойкость; плита перекрытия; МКЭ; температура; конструктивно-анизотропная конструкция.

Введение. В данной работе рассматривается архитектурно-строительная система «Монофант» [1] (аббревиатура: монолитная фантазия) созданная на основе принципов, методик, опыта внедрения конструктивных систем, разработанных Харьковским национальным университетом городского хозяйства им. А.Н. Бекетова в течение последних 30 лет. Следует также отметить, что она отличается от известных конструктивных реализаций подобного рода (системы «Рампа», «Икар», «Добол» и др.) [3], так как построена на основе развития и совершенствования, как теоретических основ, так и практических навыков, необходимых для выполнения исследований данного типа и накопленных в процессе изучения комплекса проблем, являющихся следствием результатов.

Моделирование различных схем нагрузок на конструктивно-анизотропные конструкции различной гауссовой кривизны является весьма актуальной задачей.

Созданные за последнее время системы наглядно демонстрируют позитивность подхода, в основе которого лежит проблемная направленность создаваемой структуры и оптимизация принятых решений, сформированных на базе критериев-компромиссов. Фундаментом их разработки служат принципы, которые издавна используются в инженерном искусстве. К ним относятся:

- использование материалов, для конструкции в целом и отдельных ее частей, в связи с их функциональным назначением;
- формулировки требований к конструктивным элементам согласно иерархии (сверху вниз): конструкция - материал - технология (расширение 3-го постулата В.Г. Шухова;
- разработка эффективных технологий производства конструкций, транспортировки и монтажа, а также оснащение, что исключает появление в конструкции на этих стадиях деформаций и усилий, которые превышают аналогичные от эксплуатационных нагрузок;

- максимальное использование базы строительной индустрии;
- существенное, по сравнению со стоимостью материалов, уменьшение затрат на транспортно-технологические операции;
- обеспечение устойчивости и жесткости здания путем пространственного расположения его элементов;
- дифференциация элементов, которые воспринимают горизонтальные и вертикальные нагрузки (для высотных зданий)
- обеспечение контурного или близкого к нему опирания горизонтальных и вертикальных конструкций оболочечного типа;
- выбор типов и количества связевых элементов (диафрагм и ядер жесткости) в соответствии с условием необходимой достаточности: увеличением их размеров в плане, а не количестве;
- создание в конструкции при действии эксплуатационных нагрузок напряженно-деформированного состояния заданного вида; здесь цель - аттрактор - квазиэнергетичность [4, 5, 6];
- рационализация параметров основных несущих элементов за счет предоставления им простой внешней и сложной внутренней геометрии [5, 6, 7].

В качестве **объекта** исследования принимается плита - архитектурно-строительной системы «Монофант» (рис.1).

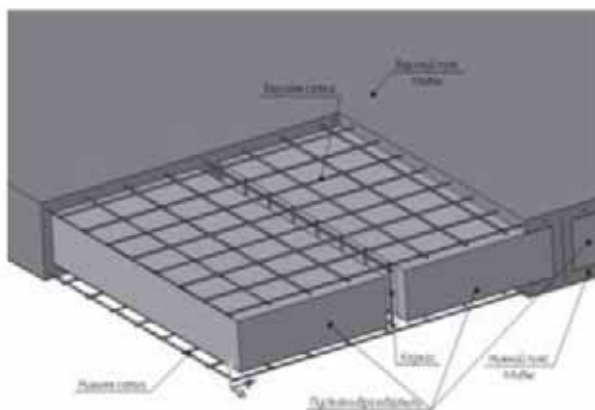


Рис. 1.- Конструктивные особенности плиты конструктивной системы «Монофант»

Предмет исследования – пожарные воздействия на конструктивно-

анизотропную плиту, определение толщины обшивки плиты, которая соответствует аномальным воздействиям.

Эффективность конструкции плиты характеризуется простой внешней и сложной внутренней геометрией. Основной идеей здесь является установка в тело железобетонной конструкции вкладышей обусловленной формы и размеров, выполненных из легких, часто используемых материалов в строительстве таких, например, как пенополистирол, минеральная вата такой конструкции обосновывается также симметрией сечений, обуславливающей возможность ее произвольного опирания, что порождает знакопеременность поля изгибающих моментов.

Сказанное является следствием различия сопротивлений бетона растяжению и сжатию, с одной стороны, и максимальной эффективностью (в смысле расхода материалов) односторонне орбренных систем с другой. Таким образом, конструкция рассмотренных оболочек состоит из двух (верхней и нижней) обшивок, внутренних ребер и вкладышей-пустотообразователей.

Конструктивное решение армирования моделей оболочек представляет собой систему криволинейных каркасов, описывающих форму оболочки, а также гнутых стержней, расположенных в ребрах.

Теория расчета на огнестойкость. Для исследований высокотемпературного нестационарного теплового воздействия на бетон [3] необходимо знать распределение влажности $W(x, \tau)$, температуры $t(x, \tau)$ и давления пара $p(x, \tau)$ в теле бетона как функции пространственной переменной и времени. Напряжения, возникающие от давления пара, заполняющего поровое пространство бетона, от разницы температурных деформаций составляющих бетон материалов, фазовых переходов и перекристаллизации минералов цементного камня и заполнителей классифицируются как температурные напряжения в структуре бетона. Эти напряжения влияют на появление и развитие в бетоне микро- и макротрещин и, следовательно, на

прочностные и деформативные свойства и могут привести материал к разрушению. Растягивающие напряжения от давления насыщенного пара равны [1, 2]:

$$\sigma_{bt} = 32 \cdot \pi \cdot N \cdot \lambda \cdot L \cdot \Delta t \cdot \frac{W_v}{[n(1-n)]} \quad (1)$$

где с достаточным приближением приняты следующие величины:

N - количество капилляров на 1 м^2 рассматриваемого сечения;

λ - теплопроводность керамзитобетона сухой зоны [$\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})$];

L - коэффициент фильтрации пара, при среднем радиусе капилляра, $r=10^{-5}$ м;

$\Delta t=200$ $^\circ\text{C}$ - перепад температур по сечению;

W - объемная влажность бетона;

n - общая пористость бетона.

Таким образом, растягивающие напряжения в бетоне, подсчитанные по этой формуле, при опытном перепаде температур 200 $^\circ\text{C}$ составили:

$$\sigma_{ct}=1,2 \text{ МПа} > f_{ctm}=1 \text{ МПа}.$$

Минимальный перепад температур, при достижении напряжениями от порового давления предела прочности бетона на растяжение, равен - 167 $^\circ\text{C}$. Таким образом, появление трещин в защитном слое бетона обогреваемого низа плиты от давления пара возможно уже при нагреве его свыше $170\dots 180$ мин. При большей влажности перепад температур будет меньшим. Кроме развития трещин при нагреве в бетоне могут возникать и внутренние напряжения от неравномерного нагрева. Растягивающие напряжения от фильтрации пара, внешней нагрузки и неравномерного нагрева суммируются.

Экспериментальные исследования, проведенные Шмуклером В.С. [3] на огневые воздействия плит, показывают, что, температура необогреваемой поверхности плиты в течение первого часа пожара, практически, не росла. Нагрев поверхности стал ощутимым через 1 час 15 мин. огневого воздействия, после начала интенсивного выгорания синтетического утеплителя (пенополистирола).

Максимальная температура нагрева после $2,5$ часов не превысила 80°C , что намного ниже критической (220 $^\circ\text{C}$). Обогреваемая поверхность плиты при огневых испытаниях была наиболее нагретой из всех железобетонных конструкций. При нагреве плиты по режиму "стандартного" пожара нижняя (обогреваемая) грань должна за 1 -й час испытания нагреться до 850 $^\circ\text{C}$. Перепад температур по бетонному сечению здесь значительно больший, а данное обстоятельство является следствием того, что за это время внутриводная вода не успевает полностью испариться. Однако, при уменьшении толщины бетона (например, для стенки керамзитоблока с ППС-утеплителем толщиной 25 мм) перепад температур будет приближаться к рассмотренному выше. Возрастание давления по низу утеплителя зафиксировано в диапазоне температур $100\dots 150$ $^\circ\text{C}$, а максимальное значение избыточного давления 90 кПа. (1 ат.= $98,1$ кПа) находится в интервале температур $130\dots 140$ $^\circ\text{C}$ и по времени продолжалось не более минуты. После нагрева бетонной грани по низу утеплителя свыше 150 $^\circ\text{C}$ происходило резкое падение давления среды в полости, а при нагреве свыше 200 $^\circ\text{C}$ оно было уже незначительным (менее 5 кПа). Следует также отметить, что максимальное давление по низу полости не достигло величины в 1 ат. В верхней части объема полости возрастание давления также обнаружено при прогреве низа утеплителя до $100\dots 150$ $^\circ\text{C}$. По величине давление было на порядок ниже, чем внизу (до 8 кПа).

Максимальная температура нагрева поверхности плиты превышала 800 $^\circ\text{C}$ в интервале времени $0,5-0,75$ часа от начала пожара, что корректно согласуется с численными исследованиями, проведенными в ПК «ANSYS», показывающими температуру на огневом воздействии плиты 899 $^\circ\text{C}$ через 1 час стандартного пожара.

Стандартный температурный режим определяется по формуле:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t + 1) [^\circ\text{C}], \quad (2)$$

где Θ_g - температура газовой среды в противопожарном отсеке [$^\circ\text{C}$];

t - час [мин].

Расчет распределения температуры по сечению строительных конструкций в различные моменты времени рассчитывают на основе дифференциальных уравнений теплопроводности, которое при изменяемых теплотехнических коэффициентах теплопроводности имеет вид:

$$\rho C(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \nabla [\lambda(\Theta) \nabla \Theta], \quad (3)$$

где Θ — температура, °C;

t — время, мин;

$\lambda(\Theta)$ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);

$C(\Theta)$ — коэффициент удельной теплоемкости, кДж/(кг·°C);

ρ — плотность бетона, кг/м³.

При анализе численного эксперимента поведения конструкции при воздействии на нее стандартного пожара построена трехмерная КЭ модель конструктивной системы, позволяющая решать температурную задачу в нестационарных условиях.

Модель состояла из 142 940 конечных элементов, при этом количество узлов — 439067.

При численном решении задачи принимались такие исходные данные: коэффициент Пуассона бетона 0,17; коэффициент конвективного теплообмена на поверхности воздействия огня принимался = 29 Вт/м²·°C; задавалось условие теплоотдачи излучением в окружающую среду в виде коэффициента излучения 0,85. При выполнении расчета на торцевых поверхностях моделей задавалось условие нулевой скорости теплового потока. Так как, теплофизические свойства материалов зависят от температуры — задача рассматривалась как нелинейная.

Расчеты выполнялись в среде ПК «ANSYS» [8].

Рассмотрено 2 типа сечений плит перекрытия высотой 300 мм и 500 мм. В обоих случаях толщина обшивки составляла 50 мм. Ширина ребер 150 мм, шаг ребер для плиты перекрытия высотой 300 мм — 1000 мм, а для плиты 500 мм — 500 мм (рис. 2). В качестве утеплителя при расчете температур рассматривался огнеупорный

экструдированный пенополистирол.

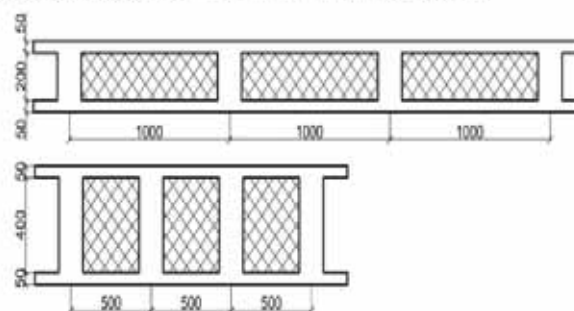


Рис. 2. Поперечные сечения рассматриваемых плит перекрытия

Получено распределение температуры по высоте сечения для обоих вариантов как по бетонному сечению, так и по утеплителю. Стоит отметить, что в расчете не рассматривалось структурное разрушение материалов (бетон и пенополистирол) в следствии действия высоких температур. На рисунках 3 и 4 показаны распределения температуры для плиты перекрытия высотой 300 мм по бетонному сечению и по утеплителю соответственно.

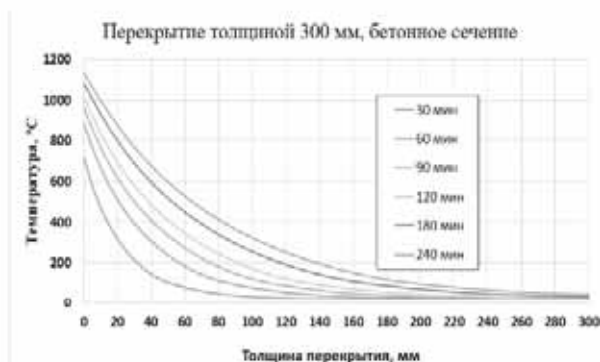


Рис. 3 Распределение температуры по высоте плиты перекрытия 300 мм по бетонному сечению.

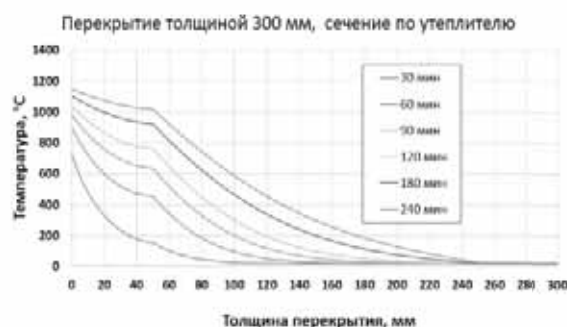


Рис. 4. Распределение температуры по высоте плиты перекрытия 300мм по утеплителю.

Распределение температуры по высоте сечения перекрытия 300 мм через 60 мин после воздействия стандартного пожара приведены на рисунке 5 то же, но только для предела огнестойкости R60.

Распределение температуры по высоте сечения перекрытия 300 мм через 60 мин стандартного пожара

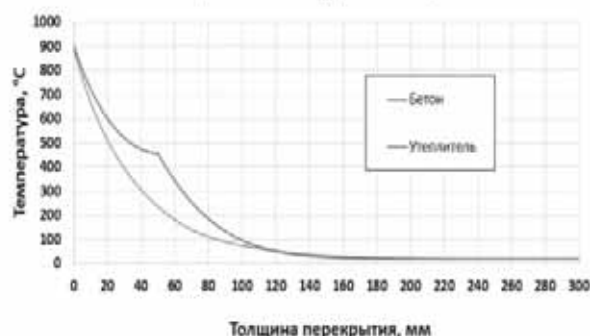


Рис. 5. Распределение температуры по высоте плиты перекрытия 300мм по бетонному сечению и по утеплителю для предела огнестойкости R60.

На рисунках 6 и 7 показаны распределения температуры для плиты перекрытия высотой 500мм по бетонному сечению и по утеплителю соответственно.

Перекрытие толщиной 500 мм, бетонное сечение

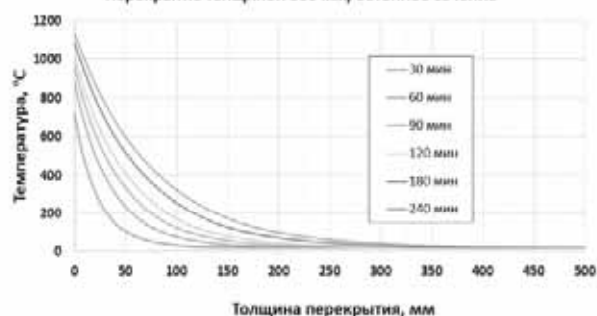


Рис. 6 Распределение температуры по высоте плиты перекрытия 500мм по бетонному сечению

Перекрытие толщиной 500 мм, сечение по утеплителю

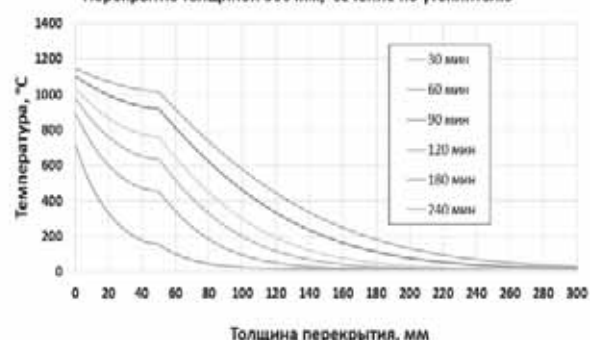


Рис. 7. Распределение температуры по высоте плиты перекрытия 500мм по утеплителю.

Распределение температуры по высоте сечения перекрытия 500 мм через 60 мин после воздействия стандартного пожара приведены на рисунке 8 (предел огнестойкости R60).

Распределение температуры по высоте сечения перекрытия 500 мм через 60 мин стандартного пожара

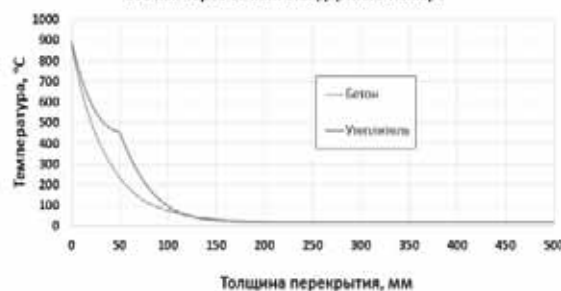


Рис. 8. Распределение температуры по высоте плиты перекрытия 500мм по бетонному сечению и по утеплителю для предела огнестойкости R60.

На рисунках 9 и 10 показаны изополя распределения температур для определенных нормативными документами пределов огнестойкости для плиты 300 мм и 500 мм соответственно.

Вывод и рекомендации. Для плит перекрытий жилых и административных зданий чаще всего ставится требование огнестойкости R60. Поскольку нижняя обшивка растянута, то негативное влияние высоких температур на прочность бетона не является определяющим фактором. При установке арматурных стержней на расстояние 30 мм от наиболее растянутой фибры сечения при R60 действуют температуры для плит 300 мм и 500 мм приблизительно одинаковы по бетонному сечению — 395 °С, по утеплителю — 520 °С. Данные значения температур по бетонному сечению даже несколько ниже тех значений, что приводятся в ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Еврокод 2. «Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие положения. Расчет конструкций на огнестойкость» (EN 1992-1-2:2004, IDT) для сплошной плиты перекрытия толщиной 200 мм [9, 10]. При воздействии таких температур прочность арматуры снижается на 25-30%, что является допустимым, так как полезные

нагрузки в соответствии с нормативными документами во время пожара снижаются. Как следствие, толщина нижней обшивки должна быть не менее 50 мм.

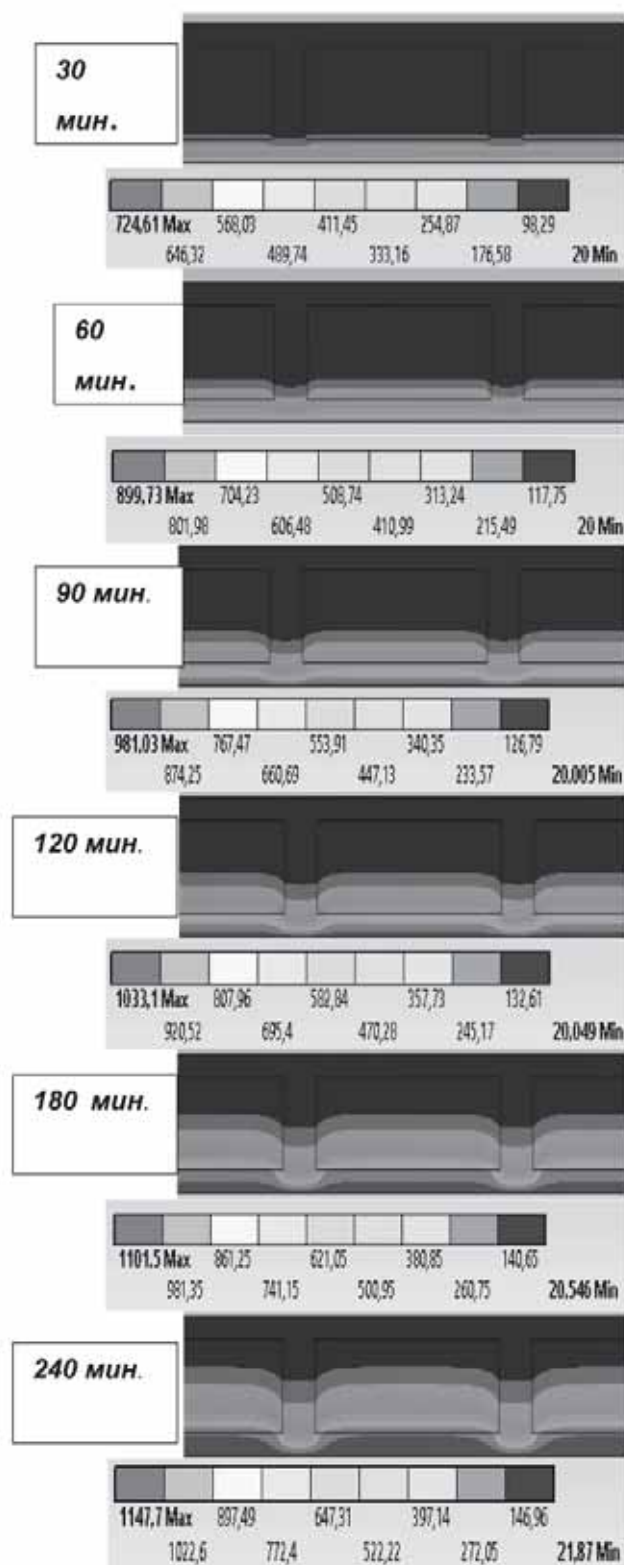
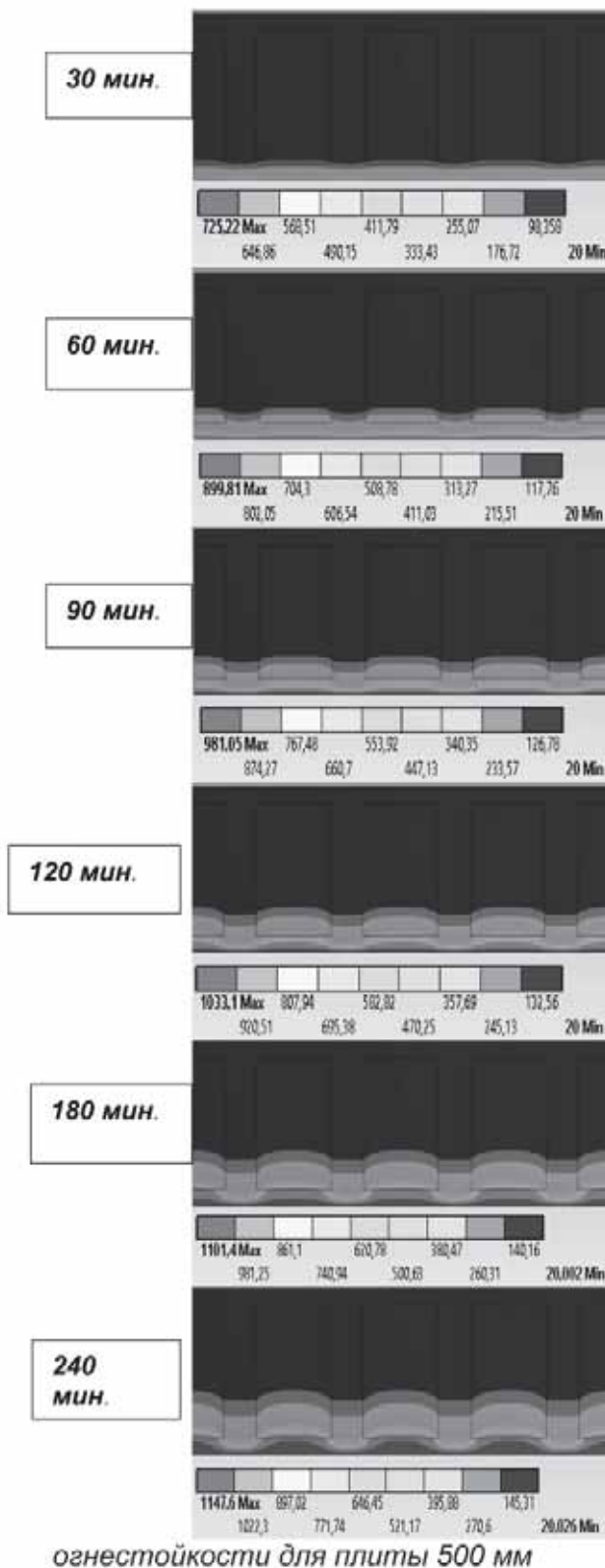


Рис. 9. Изополя распределения температур для определенных нормативными документами пределов огнестойкости для плиты 300 мм

Рис. 10. Изополя распределения температур для определенных нормативными документами пределов



огнестойкости для плиты 500 мм

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Патент на корисну модель №89464. Шмуклер В.С., Бабаєв В.М., Бугаєвський С.О., Бережна К.В., Карякін І.А., Кондращенко В.І., Сеїрські І.М. / Каркасна будівля «Монофант». Дата публікації 25.04.2014. Бюл. №8.

2. Жуков В.В. Термостойкость железобетонных конструкций. // Жуков В.В., Панюков Э.Ф. – К.: Будивельник, 1991. – 220с.

3. Шмуклер В.С. Каркасные системы облегченного типа / В.С. Шмуклер, Ю.А. Климов, Н.П. Бурак. – Харьков: Золотые страницы, 2008. – 336 с.

4. Васильков Г.В. Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма. Ростов-на-Дону: Инфосервис, 2003

5. Шмуклер В.С. Трансформация внутренней геометрии конструкции при рационализации ее параметров // Юбилейные научные чтения по проблемам теории железобетона. ИПЦ МИКХиС, Москва, 2005. – с. 124 – 134.

6. Shmukler V. S., Evolutionist approach in rationalization of building structures. / ISEC-03 Third International structural Engineering and construction Conference, Shunan, Japan, 2005.

7. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Стрелец-Стрелецкий Е.Б. и др. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс «Лира-Windows». – Киев: Факт, 1997. – 137 с.

8. Моделирование, разработка продукта (комплекса) "Ansys" [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.ansys.com>

9. ДСТУ-Н Б EN 1992-1- 2:2012 Еврокод 2. «Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие положения. Расчет конструкций на огнестойкость» (EN 1992-1- 2:2004, IDT).

10. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6.-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84 і EN 1992-1- 1 (Eurocod 2) / В.М. Бабаєв, А.М. Бамбура, О.М. Пустовойтова та ін.. за заг.ред. В.С. Шмуклера. – Харків: Золоті сторінки, 2015. – 208с.

АНОТАЦІЯ

Виконано оцінку вогнестійкості конструктивно-анізотропної залізобетонної плити архітектурно-будівельної системи «Монофант». На підставі результатів чисельного експерименту, що моделює роботу конструкції при односторонньому нагріванні по режиму стандартної пожежі отримані температурні поля для 30, 60, 90, 120, 180 і 240 хв. При аналізі чисельного експерименту поведінки конструкції при впливі на неї стандартної пожежі побудована тривимірна KE модель конструктивної системи, що дозволяє вирішувати температурне завдання в нестационарних умовах. Розрахунки виконувалися в середовищі ПК «ANSYS».

Розглянуто 2 типи перетинів плит перекриття висотою 300 мм і 500 мм. В обох випадках товщина обшивки становила 50 мм. Ширина ребер 150 мм, крок ребер для плити перекриття висотою 300 мм - 1000 мм, а для плити 500 мм - 500 мм. Як утеплювач при розрахунку температур розглядався вогнетривкий екструдований пінополістирол. Отримано розподіл температури по висоті перетину для обох варіантів: як по бетонному перекриттю, так і утеплювачу.

Ключові слова: вогнестійкість; плита перекриття; МСЕ; температура; конструктивно-анізотропна конструкція.

ANNOTATION

The fire resistance of the constructive-anisotropic reinforced concrete slab of the architectural and construction system "Monophant" is performed. By performing a numerical study of the design model exposed to high temperatures using finite element software. Based on the results of a numerical experiment simulating structural behavior with one-sided heating according to the standard fire mode, the temperature fields for 30, 60, 90, 120, 180 and 240 minutes were obtained. A conclusion is made on the change in fire resistance based on the requirements of regulatory documents.

Keywords: fire resistance; slab; FEM; temperature; constructive anisotropic construction.