

УДК 614.841.45

РАСЧЕТ ОГНЕСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОГРАЖДАЮЩЕГО КОНТУРА НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА УТОЧНЕННЫМ МЕТОДОМ

С.В.Новак^{1*}, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., П.Г.Круковский², докт. техн. наук, проф., В.Г.Поклонский³, канд. техн. наук

¹Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты, Украина

²Институт технической теплофизики, Украина

³Государственное предприятие "Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций", Украина

ИНФОРМАЦИЯ ПРО СТАТЬЮ

Поступила в редакцию: 30.10.2017

Прошла рецензирование: 09.11.2017

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

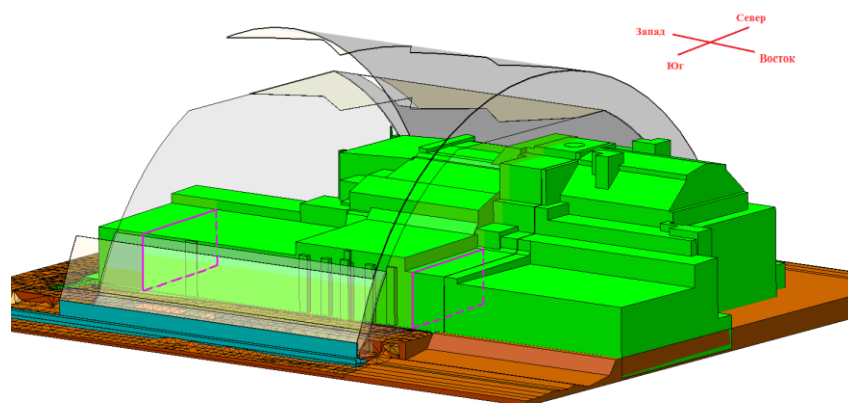
напряженно-деформированное состояние, огнестойкость, стандартный температурный режим, строительные конструкции, тепловое состояние, условный пожар, уточненный расчетный метод.

АННОТАЦИЯ

Дана формулировка задачи по оценке огнестойкости строительных железобетонных конструкций ограждающего контура нового безопасного конфайнмента уточненным расчетным методом с использованием подхода, основанного на анализе части конструктивной системы сооружения, при котором учитывается воздействие условного пожара, развивающегося по стандартному температурному режиму, на конструкции, составляющие отдельное помещение. Приведены данные о тепловом и напряженно-деформированном состояниях этих строительных конструкций в условиях воздействия условного пожара и результаты оценки их огнестойкости.

Ограждающий контур (далее – ОК) – это совокупность железобетонных строительных конструкций в виде вертикальных и горизонтальных ограждающих конструкций (стен, покрытий), одно из назначений которых предотвратить распространение возможного пожара за пределы нового безопасного конфайнмента (далее – НБК) объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС [1]. ОК состоит из ограждающих конструкций зданий машзала, деаэрационной этажерки, блоков В (сооружений, в которых расположено технологическое оборудование для подготовки и очистки среды) и ВСПО (сооружений, в которых расположены вспомогательные системы реакторных

установок). Месторасположение ОК на примере стен машзала приведено на рисунке 1. Отсутствие данных об огнестойкости строительных конструкций ОК и оценки соответствия их огнестойкости существующим требованиям не позволяло обосновать возможность применения как существующих, так и проектируемых конструкций ограждающего контура НБК. Поэтому целью исследований, которые изложены в данной статье, являлась оценка огнестойкости строительных конструкций ограждающего контура НБК.



— — ограждающий контур НБК

Рисунок 1 – Месторасположение Западной и Восточной контрфорсных стен машзала на общем виде объекта «Укрытие»

*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

Постановка задачи и метод ее решения.

На основании установленной классификации для НБК, как сооружения I степени огнестойкости [1], в соответствии с ДБН В.1.1-7 [2] строительные конструкции, выполняющие функции ограждающего контура НБК, должны иметь предел огнестойкости не менее 150 мин (класс огнестойкости REI 150). Исходя из этого, постановка задачи сформулирована следующим образом. Для строительных конструкций ОК при условном пожаре длительностью 150 мин, который развивается по стандартному температурному режиму [3], следует определить выполнение условий сохранения их несущей и теплоизолирующей способностей, а также целостности [3].

Для решения поставленной задачи для оценки огнестойкости по признакам потери несущей и теплоизолирующей способностей использованы уточненные расчетные методы и подход, основанный на анализе части

конструктивной системы сооружения [4, 5], при котором учитывается воздействие пожара на конструкции, составляющие отдельное помещение. При этом огнестойкость строительных конструкций ОК оценивают с учетом влияния на их тепловое и напряженно-деформированное состояния других строительных конструкций, которые расположены в пределах этого отдельного помещения. Например, на рисунке 2 показаны стены одного из помещений сооружения блока В, которые являются частью ОК. Для оценки огнестойкости этих стен рассматривают воздействие условного пожара длительностью 150 мин на тепловое и напряженно-деформированное состояния всех строительных конструкций (стен, перекрытий, колонн, ригелей), которые расположены в этом помещении (рисунок 3). При тепловое и напряженно-деформированное состояния стен ОК учитывают влияния других строительных конструкций, находящихся в помещении.

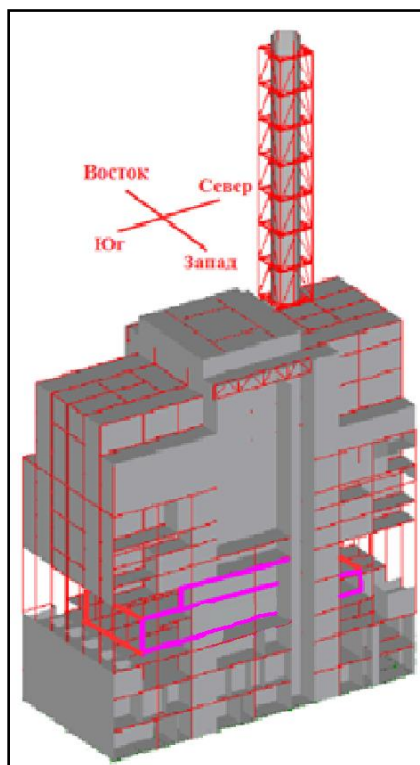


Рисунок 2 – Общий вид сооружения блока В с выделенным красным контуром помещением, стены которого являются частью ОК (обозначены розовым цветом)

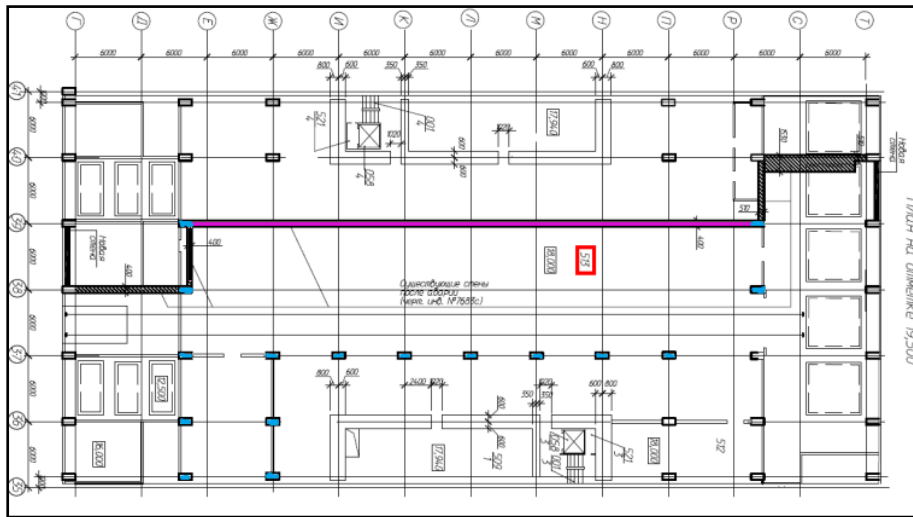


Рисунок 3 – Рассматриваемое помещение блока В в плане на определенной отметке (розовым цветом обозначены стены помещения, являющиеся частью ОК; синим – колонны)

Для расчетов теплового и напряженно-деформированного состояний строительных конструкций использован метод конечных элементов [6], реализованный в компьютерных программах ANSYS-CFD [1] (для решения теплотехнической задачи) и «ЛИРА» [1] (для решения статической задачи). Расчеты теплового и напряженно-деформированного состояний строительных конструкций для помещений блоков ВСПО, В, ДЭ и машзала для времени воздействия условного пожара 150 мин проведены на основе разработанных трехмерных моделей. При этих расчетах теплофизические и механические свойства бетона и стальной арматуры брались из [5, 7].

При решении теплотехнической задачи принималось, что распределение температуры в помещении, в котором происходит условный пожар, является равномерным (температура

газовой среды имеет одинаковое значение в любой точке помещения), а во времени она изменяется по стандартному температурному режиму [3]. Горячие газы нагревают строительные конструкции, находящиеся в этом помещении (стены, перекрытия, покрытия, колонны и др.), путем радиационно-конвективного нагрева. По объему конструкции тепло распространяется от нагретой поверхности к поверхности охлаждения теплопроводностью, а наружные поверхности конструкций отдают теплоту в окружающую среду путем радиационно-конвекционного теплообмена. Таким образом, основой математической модели, определяющей тепловые процессы в рассматриваемых конструкциях, является трехмерное дифференциальное уравнение теплопроводности следующего вида:

$$c_d \rho_d \frac{\partial \theta_d}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_d \frac{\partial \theta_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_d \frac{\partial \theta_d}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_d \frac{\partial \theta_d}{\partial z} \right), \quad (1)$$

с начальным условием

$$\theta(x, y, z, 0) = \theta_0, \quad (2)$$

где c_d – удельная теплоемкость материала (бетона, стали) в конструкции, Дж/(кг·°C);

ρ_d – плотность материала в конструкции, кг/м³;

λ_d – коэффициент теплопроводности материала в конструкции, Вт/(м·°C);

θ_d – температура материала в конструкции, °C;

t – время, с;

x, y, z – координаты в декартовой системе координат, м.

Плотность теплового потока \dot{h}_{net} на внутренней поверхности конструкции определяется по формуле:

$$\dot{h}_{\text{net}} = \alpha^* (\theta_g - \theta_m), \quad (3)$$

где α^* – суммарный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности конструкции, Вт/(м²·°C), который рассчитывают по формуле (4);

θ_g – температура газовой среды в помещении, °C;

θ_m – температура внутренней поверхности конструкции, °C.

$$\alpha^* = \alpha_c + \varepsilon_m \sigma [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] / (\theta_g - \theta_m), \quad (4)$$

где α_c – коэффициент теплоотдачи конвекцией на внутренней поверхности конструкции, $\alpha_c = 25$ Вт/(м²·°C) [4];

ε_m – коэффициент теплового излучения внутренней поверхности конструкции $\varepsilon_m = 0,7$ [5];

σ – постоянная Стефана Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·°C⁴).

Плотность теплового потока на наружной поверхности конструкции определяется по формулам, аналогичным (3), (4), с той разницей, что значение температуры окружающей среды задают постоянной и равной 20 °C [4], а значение коэффициента теплоотдачи конвекцией составляет 4 Вт/(м²·°C) [4].

Решением теплотехнической задачи определяют трехмерные температурные поля в строительных конструкциях для помещений блоков ВСПО, В, ДЭ и машзала для времени воздействия условного пожара 150 мин, по которым оценивают выполнение условия сохранения теплоизолирующей способности [3,

4] для строительных конструкций ОК НБК, а также определяют напряженно-деформированные состояния строительных конструкций путем решения статической задачи.

При решении статической задачи использована математическая модель [1], которая содержит систему дифференциальных уравнений механического равновесия (5); уравнения (6), определяющие удлинения и сдвиги при деформации конструкции, заданной перемещениями u_x , u_y , u_z , параллельными направлениям осей; уравнения температурных напряжений, обуславливающих добавочные удлинения и сдвиги; уравнения, определяющие полные удлинения, которые складываются из удлинений, вызванных изменением температуры, и удлинений, обусловленных напряжениями.

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + X = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + Y = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z = 0 \end{cases} \quad (5)$$

где σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{xz} – напряжение на элементе поверхности $dy \cdot dz$;

σ_{yx} , σ_{yy} , σ_{yz} – напряжение на элементе поверхности $dz \cdot dx$;

σ_{zx} , σ_{zy} , σ_{zz} – напряжение на элементе поверхности $dx \cdot dy$;

X , Y , Z – составляющие вектора объемной силы, отнесенной к единице объема.

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, & \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, & \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}, & 2\varepsilon_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z}, & 2\varepsilon_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}, \end{cases} \quad (6)$$

При решении статической задачи принимались следующие положения, выполнение которых необходимо при рассмотрении части конструктивной системы сооружения [5]:

– часть конструктивной системы, которая подвергается нагреву при пожаре, определяют, исходя из возможных температурных расширений и деформаций так, чтобы взаимодействие с другими частями сооружения

было представлено независимыми от времени граничными условиями в течение всей продолжительности пожара;

– граничные условия на опорах, силы и моменты на границе части конструктивной системы, принятые в момент времени $t = 0$, при пожаре считают неизменными. Эти значения граничных условий определяют из расчета всего сооружения при нормальной температуре;

– в пределах рассматриваемой части конструктивной системы учитывают характерный вид отказа под воздействием пожара, зависящие от температуры свойства материалов и жесткости конструкций, эффекты температурных расширений и деформаций (непрямые воздействия пожара).

Решением статической задачи определяют деформации сжатого бетона и растянутой арматуры железобетонных конструкций, максимальное значение прогиба горизонтальных конструкций, максимальное значение продольного смещения нагруженного конца вертикальных конструкций, по которым оценивают выполнение условия сохранения несущей способности [1, 5] для строительных конструкций ОК НБК.

Для оценки огнестойкости по признаку потери целостности использован метод [5],

основанный на использовании табличных данных, полученных по результатам испытаний строительных конструкций на огнестойкость.

Результаты расчетов и их анализ

Результатами решения теплотехнической и статической задач являются трехмерные поля температур и деформаций в строительных конструкциях для помещений блоков ВСПО, В, ДЭ и машзала для времени воздействия условного пожара 150 мин. Рассмотрим детально эти результаты для строительных конструкций помещения блока В, приведенного на рисунках 2, 3.

На рисунке 4 показаны геометрическая и сеточная модели помещения, на рисунке 5 – распределение температуры в сечении этого помещения.

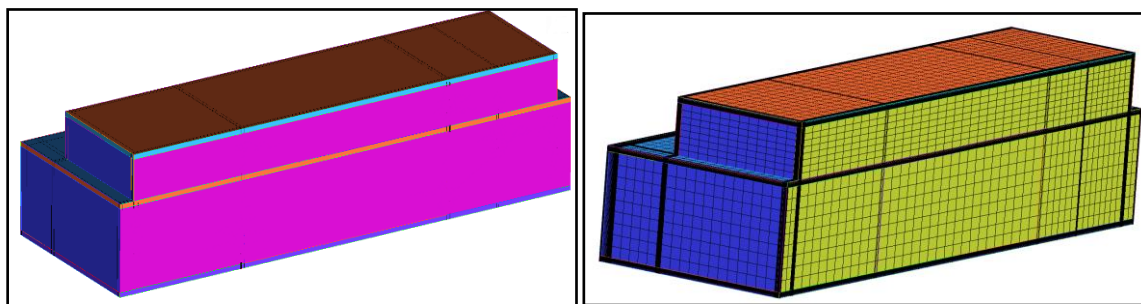


Рисунок 4 – Геометрическая (а) и сеточная (б) модели помещения (розовым цветом обозначено стены помещения, являющиеся частью ОК), принятые при решении теплотехнической задачи

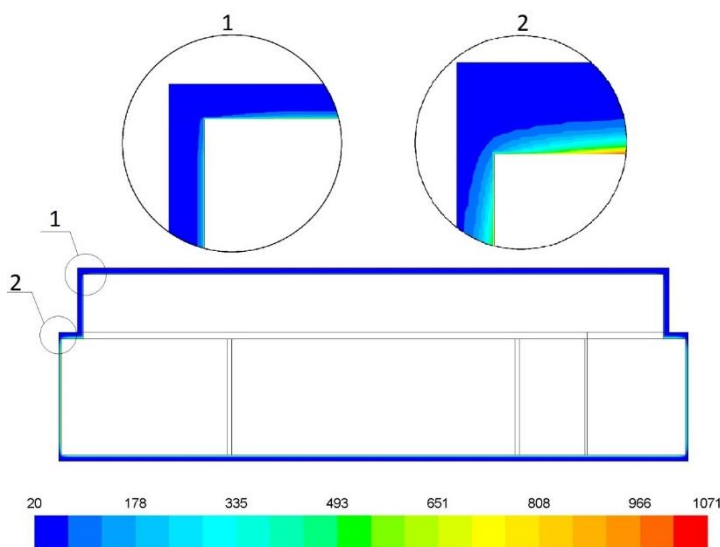


Рисунок 5 – Распределение температуры в сечении помещения

Взаимное расположение ригелей, колонн и примыкающих к ним стен в помещении показано на рисунке 6. Сеточные модели колонн

и примыкающих стен приведены на рисунке 7. Распределение температуры в сечении угловой колонны и примыкающих стен показано на

рисунке 8. На рисунке 9 приведено распределение температуры по толщине стены, являющейся частью ОК.

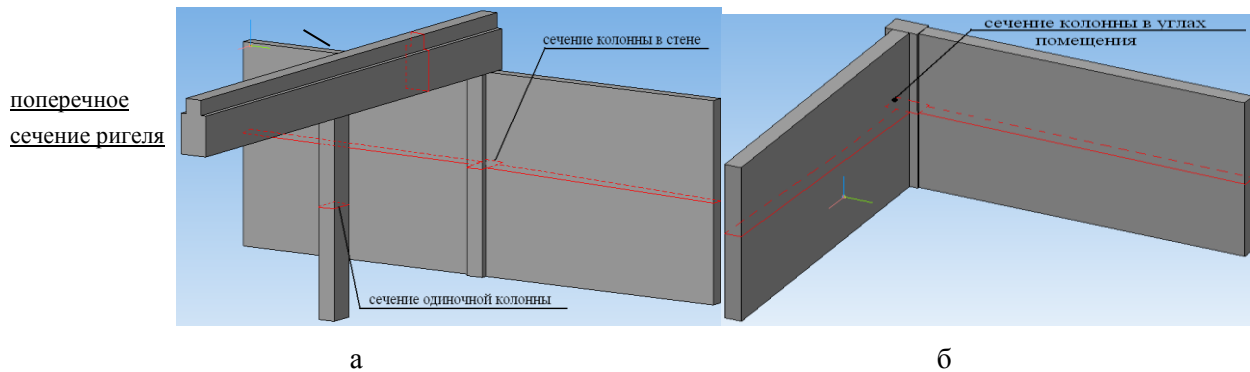


Рисунок 6 – Общий вид и взаимное расположение рассматриваемых конструкций помещения: а – опирание ригеля на колонну в стене; б – угловая колонна с примыкающими стенами

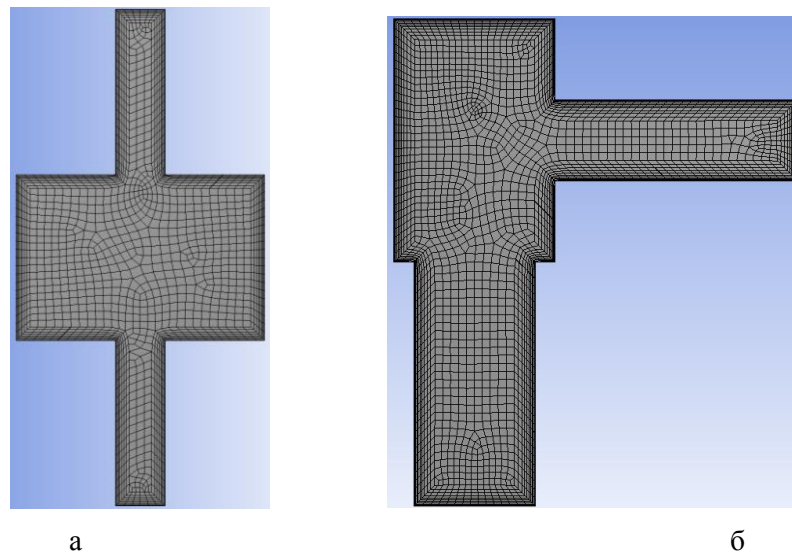


Рисунок 7 – Сеточные модели для вариантов колонны в стене (а) и колонны в углу помещения (б)

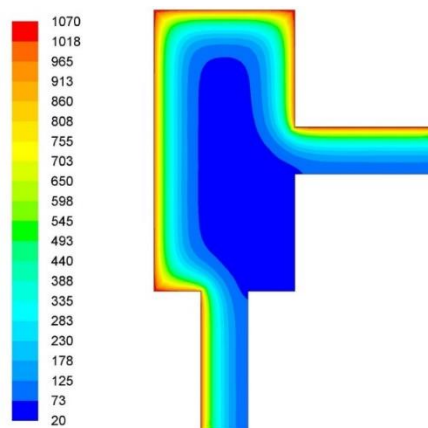


Рисунок 8 – Распределение температуры в сечении угловой колонны и примыкающих стен

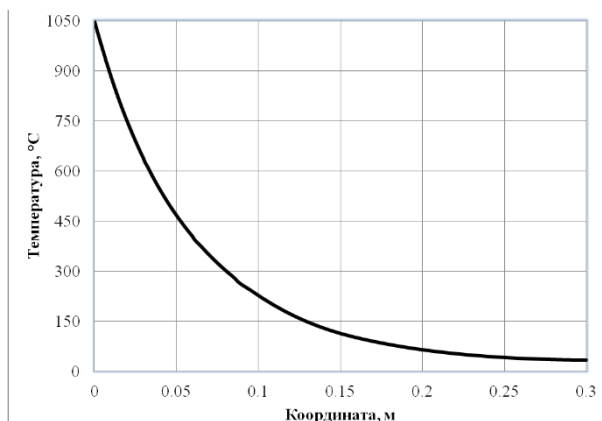


Рисунок 9 – Розподілення температури по товщині стіни в момент часу 150 мин

Из анализа температурных полей, полученных решением теплотехнической задачи, определено, что для продолжительности воздействия условного пожара 150 мин температура необогреваемой (наружной) поверхности стен, расположенных в рассматриваемом помещении блока В, не превышает предельных значений, установленных в ДСТУ Б В.1.1-4 [3] – превышение средней температуры на необогреваемой поверхности стен над начальной средней температурой этой поверхности на 140 °C или превышение температуры в любой точке необогреваемой поверхности стен над начальной температурой в

этой точке на 180 °C. Максимальное расчетное значение температуры необогреваемой поверхности этих стен составляет 25 °C. Из этого следует, что теплоизолирующая способность стен, расположенных в этом помещении и выполняющих функции ограждающего контура в блоке В, при условном пожаре продолжительностью 150 мин сохраняется.

На рисунке 10 приведена сеточная модель рассматриваемого помещения блока В, которую применяли при решении статической задачи. В этой модели использовали физически нелинейные универсальные пространственные 6-ти и 8-ми узловые конечные элементы [1].

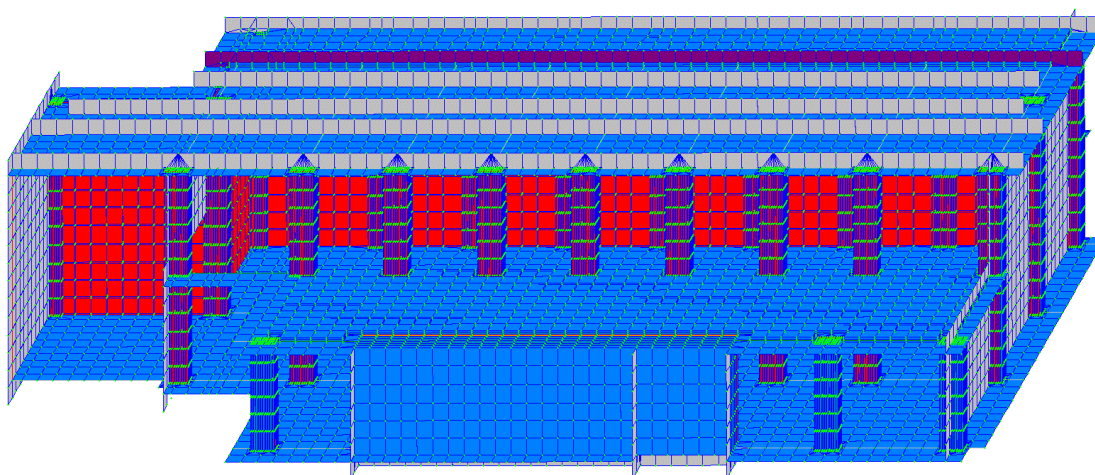


Рисунок 10 – Сеточная модель помещения блока В, принятая при решении статической задачи

Полученное решением статической задачи напряженно-деформированное состояние строительных конструкций помещения, обусловленное действием

статических нагрузок и тепловым воздействием условного пожара продолжительностью 150 мин, представлено на рисунке 11.

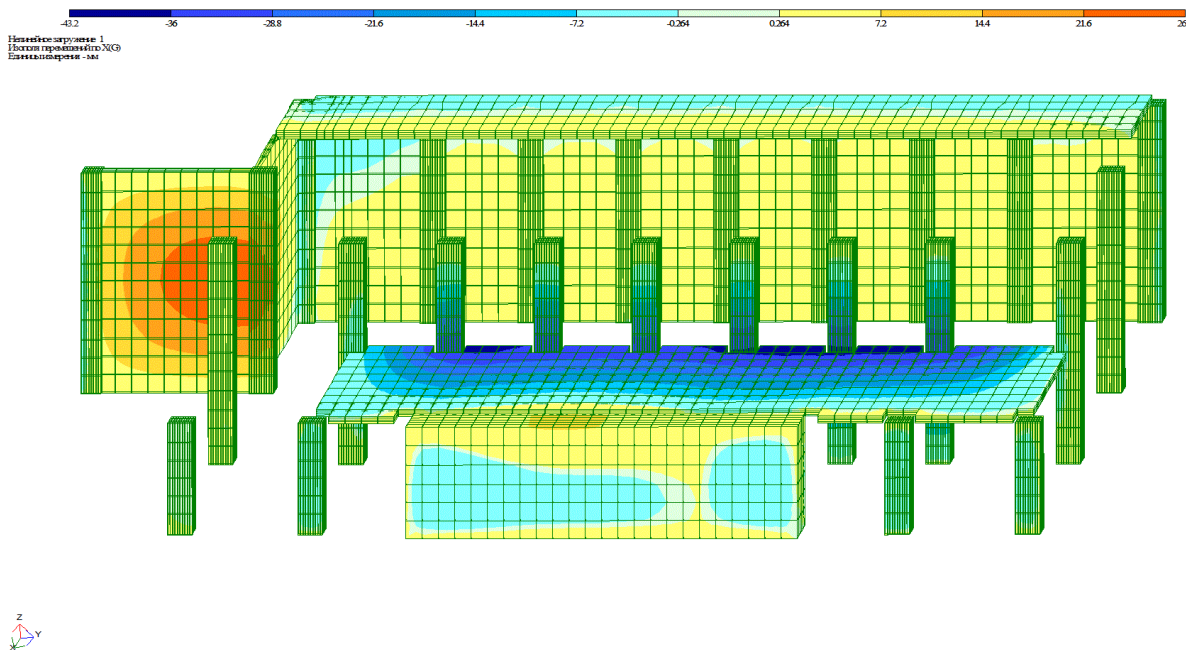


Рисунок 11 – Распределение перемещений строительных конструкций в направлении оси x

Из анализа напряженно-деформированного состояния строительных конструкций помещения, полученного решением статической задачи, определено, что для продолжительности воздействия условного пожара 150 мин расчетные значения максимального прогиба горизонтальных конструкций и максимального продольного смещения вертикальных конструкций составляют соответственно 6 мм и 10 мм, что значительно меньше предельных значений, установленных в [1]. Напряжения в строительных конструкциях помещения не превышают значений, соответствующих предельным деформациям сжатого бетона [1]. Таким образом, относительные деформации сжатого бетона и растянутой арматуры железобетонных конструкций помещения не достигают предельных значений, указанных в [1] – обрушения этих конструкций не происходит.

Из анализа результатов решений теплотехнической и статической задач, проведенных для помещений блоков ВСПО, В, ДЭ и машзала, установлено, что теплоизолирующая и несущая способности строительных конструкций, расположенных в этих помещениях и выполняющих функции ограждающего контура, при условном пожаре продолжительностью 150 мин сохраняются.

Табличным методом [5] установлено, что огнестойкость строительных конструкций по признаку потери целостности обеспечена. При

этом для части конструкций огнестойкость по признаку потери целостности обеспечена конструктивным мероприятием – использованием усиления защитного слоя бетона арматурной сеткой с ячейкой не больше 100 мм и диаметром стержней не меньше 4 мм (см. 4.5.2 ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 [5]).

Выводы

Впервые сформулирована задача оценки огнестойкости строительных железобетонных конструкций ограждающего контура нового безопасного конфайнмента уточненным расчетным методом с использованием подхода, основанного на анализе части конструктивной системы сооружения, при котором учитывается воздействие условного пожара, развивающегося по стандартному температурному режиму, на конструкции, составляющие отдельное помещение.

Определены данные о тепловом и напряженно-деформированном состояниях строительных конструкций ограждающего контура нового безопасного конфайнмента в условиях воздействия условного пожара, развивающегося по стандартному температурному режиму, полученные уточненным методом с использованием метода конечных элементов, реализованным в компьютерных программах ANSYS-CFD (для решения теплотехнической задачи) и «ЛИРА» (для решение статической задачи).

Установлено, что теплоизолирующая и несущая способности, а также целостность строительных конструкций ограждающего контура нового безопасного конфайнмента сохраняются при условном пожаре, развивающемся по стандартному

температурному режиму, продолжительностью 150 мин, на основании чего определено, что нормированная огнестойкость (класс огнестойкости REI 150) этих конструкций обеспечена.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. МЕТ-324-SIP 09-04-002.12-01 Методика оценки огнестойкости строительных конструкций, выполняющих функции ограждающего контура нового безопасного конфайнмента (ОК НБК) расчетными методами. — К.: ГП «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», 2012. — 42 с.
2. ДБН В 1.1-7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва.
3. ДСТУ Б В.1.1-4-98* Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги.
4. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT).
5. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT).
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 258 с.
7. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1991-1-2:2005, IDT).

CALCULATION OF FIRE RESISTANCE OF CONSTRUCTION STRUCTURES OF THE CIRCUIT BOX OF THE NEW SAFE CONFINEMENT BY THE ADVANCED METHOD

S.Novak¹, Cand. of Sc. (Eng.), P.Krukovsky², Doc. of Sc. (Eng.), Prof., V.Poklonsky³, Cand. of Sc. (Eng.)

¹*The Ukrainian Civil Protection Research Institute, Ukraine*

²*The Institute of Engineering Thermophysics, Ukraine*

³*The State Enterprise "State Research Institute of Building Structures", Ukraine*

KEYWORDS

stress-strain state, fire resistance, standard temperature regime, building construction, thermal state, nominal fire, advanced calculation method.

ANNOTATION

The formulation of the task of assessing the fire resistance of building reinforced concrete structures of the enclosing contour of a new safe confinement by an advanced calculation method using an approach based on an analysis of a part of the structural system of a structure is given. This approach takes into account the effect of a nominal fire, developing according to the standard temperature regime, on the structures constituting a separate room. Data on the thermal and stressed-strained states of these building structures under conditions of exposure to nominal fire and the results of an assessment of their fire resistance are given.

РОЗРАХУНОК ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНТУРУ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТА УТОЧНЕНИМ МЕТОДОМ

С.В. Новак¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., П.Г. Круковський², докт. техн. наук, проф., В.Г. Поклонський³, канд. техн. наук

¹*Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Україна*

²*Інститут технічної теплофізики, Україна*

³*Державне підприємство "Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій", Україна*

КЛЮЧОВІ СЛОВА

напружено-деформований стан, вогнестійкість, стандартний температурний режим, будівельні конструкції, теплові стани, умовна пожежа, уточнений розрахунковий метод.

АНОТАЦІЯ

Дано формулювання задач по оцінці вогнестійкості будівельних залізобетонних конструкцій огороджувального контуру нового безпечного конфайнмента уточненим розрахунковим методом з використанням підходу, який базується на аналізі частин конструктивної системи споруди, при якій враховується вплив умовної пожежі, що розвивається за стандартним температурним режимом, на конструкції, що складають окреме приміщення. Наведено дані про теплові та напружено-деформовані стани цих будівельних конструкцій в умовах впливу умовної пожежі та оцінки їх вогнестійкості.