

УДК 624.012

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ ПРЕДНАПРЯЖЕННОЙ РЕБРИСТОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ УТОЧНЕННЫМ РАСЧЕТНЫМ МЕТОДОМ

Поздеев С.В., к.т.н., доцент

Академия пожарной безопасности им. Героев Чернобыля МЧС Украины, г. Черкассы
e-mail: svp_countrymen@mail.ru

Проанализирована эффективность применения метода конечных элементов расчета предела огнестойкости преднапряженной ребристой железобетонной плиты. Сформулированы последовательности процедур для реализации расчета и способы определения предела огнестойкости. На основе разработанного метода определен предел огнестойкости предварительно напряженной ребристой железобетонной плиты. Показано, что метод конечных элементов является эффективной базой для уточненных способов расчета пределов огнестойкости несущих железобетонных строительных конструкций, особенно в сочетании с экспериментально-расчетными методами определения комплекса свойств бетона и арматурной стали.

The efficiency of applying of the calculation finite element method of fire resistance limit of prestressed ribbed reinforced concrete slab has been analyzed. The sequences of procedures for realization of the calculation and techniques of the determination of fire resistance limit have been formulated. Basing on the elaborated method, it has been determined fire resistance limit of prestressed ribbed reinforced concrete slab. It has been shown that the finite element method is an efficient base for elaborated techniques of the calculation of fire resistance limit of bearing reinforced concrete building structures, particularly in combination with experimental and calculation methods for determination of complex characteristics of concrete and steel.

(Поступила в редакцию 22 декабря 2010 г.)

ВВЕДЕНИЕ

В связи с увеличением количества пожаров и других чрезвычайных ситуаций, которые могут стать причиной пожара или являются их следствием, актуальными являются задачи совершенствования методов определения огнестойкости железобетонных строительных конструкций. В настоящее время наиболее достоверными методами определения пределов огнестойкости считаются методы, основанные на проведении огневых испытаний. Однако совершенствование технологий возведения зданий и сооружений на основе несущих железобетонных конструкций, а также технологий формования элементов конструкций и приготовления бетона затрудняет, а в некоторых случаях делает невозможным применение натурных огневых испытаний. Для Украины немаловажными факторами являются и недостаточность оснащения испытательной базы, высокая стоимость и трудоемкость проведения таких экспериментов. Альтернативой испытаниям может быть применение расчетных методов, которые имеют меньшую стоимость, трудоемкость, не требуют дорогостоящего и громоздкого экспериментального оборудования. Нормативные документы [1-3] Российской Федерации и Евросоюза устанавливают вычислительные алгоритмы таких методов, но все они основаны на грубых математических моделях механики стержней и дают большие погрешности и потому не могут быть использованы для окончательной аттестации несущих железобетонных строительных конструкций по их огнестойкости.

Методы расчета, основанные на применении более точных математических моделей поведения железобетона в условиях пожара, называются уточненными. При применении уточненных методов определения огнестойкости несущих железобетонных строительных

конструкций одним из наиболее эффективных является метод конечных элементов (МКЭ), поскольку он является универсальным, а алгоритмы его численной реализации очень хорошо отработаны и позволяют учесть все значимые особенности поведения железобетона при комбинированном действии высокотемпературного нагрева и механических нагрузок. Кроме этого, данные алгоритмы применяются в универсальных компьютерных МКЭ-системах типа ANSYS, NASTRAN, ABAQUS и др. [4, 5], в которых реализованы наиболее эффективные математические модели поведения материалов, учитывающие обширные данные зарубежных и отечественных исследователей. Тем не менее, опыт применения таких математических моделей пока недостаточен, поскольку не совсем точно определены последовательности расчетных процедур при их использовании. Целью данной работы является развитие методологии применения уточненных методов расчета предела огнестойкости, основанных на использовании МКЭ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результатами исследований многочисленных работ [1–3, 6–9] устанавливаются различные математические модели поведения бетона и арматурной стали в условиях нагрева при пожаре. Сравнительный анализ этих моделей показал их эффективность, но наибольшее приближение к экспериментальным данным дают математические модели механических свойств бетона, описанные в EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2 [3]. Поэтому данные математические модели выбраны в качестве базовых.

Математическая модель механических свойств бетона в условиях нагрева определяется набором диаграмм деформирования бетона при разных температурах, а их построение базируется на применении формул:

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{3\varepsilon_b R_{b,T}}{\varepsilon_{c_1,T} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{c_1,T}} \right)^3 \right)} \text{ при } 0 < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{c_1,T};$$

$$\sigma(\varepsilon) = R_{b,T} - \frac{R_{b,T} (\varepsilon_b - \varepsilon_{c_1,T})}{\varepsilon_{b_2} - \varepsilon_{c_1,T}} \text{ при } \varepsilon_{c_1,T} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b_2},$$

где ε_b – относительная деформация бетона;

$\varepsilon_{c_1,T}$ – относительная деформация, до которой диаграмма деформирования имеет восходящую ветвь;

ε_{b_1} – относительная деформация, до которой справедливо пропорциональное соотношение между деформацией и напряжением;

ε_{b_2} – предельная относительная деформация;

$R_{b,T}$ – расчетное сопротивление бетона сжатию, зависящее от температуры нагрева слоя бетона.

Для построения математической модели железобетонной плиты во время пожара были выбраны математические модели, описанные в нормах [1–3]. Анализ подходов в этих публикациях позволил сформулировать основные предпосылки и допущения, которые можно сформулировать следующим образом:

1. Математическая модель температурной и механической реакции на тепловое воздействие пожара описывается при помощи уравнения теплопроводности и системы дифференциальных уравнений напряженно-деформированного состояния (НДС) твердого тела при их численной реализации на базе МКЭ.

2. Для решения теплотехнической задачи используется нестационарное двумерное квазилинейное уравнение теплопроводности с эффективными теплофизическими характери-

стиками (ТФХ) бетона и арматурной стали согласно нормативным документам [1–3] в допущении, что НДС на них не влияет.

3. Учитывается возможность образования трещин в бетоне при растяжении, а также полные диаграммы деформирования бетона при сжатии.

4. Трещинообразование в бетоне определяется соответствующей теорией прочности бетона.

5. Пластическая деформация бетона и арматурной стали определяется ассоциативной теорией пластичности.

6. Поведение арматурной стали одинаково для сжатия и растяжения и имеет нелинейный характер с учетом ниспадающей ветви диаграммы деформирования, зависящей от температуры.

7. Состояние тотального разрушения элемента железобетонной конструкции определяется критическими деформациями, связанными с образованием пластического шарнира.

В качестве уравнений для описания НДС железобетонной плиты в условиях температурного воздействия пожара нами использованы уравнения МКЭ, дополненные соответствующими моделями согласно положениям инженерного подхода, приведенным выше. Основные модели, используемые для расчета, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные расчетные математические модели НДС железобетона

Особенность поведения железобетона	Используемая математическая модель (метод)	Литература
Пластическое деформирование бетона и арматурной стали	Многослойная модель ассоциативной теории пластического течения	[4]
Трещинообразование	Составной критерий прочности бетона	
Физическая и геометрическая нелинейность	Итеративный метод	

Для расчета использованы теплофизические свойства бетона (табл. 2, 3).

Таблица 2 – Температурные зависимости теплофизических свойств бетона

Коэффициент теплопроводности, $\lambda(T)$, Вт/(м·°С)	Объемная удельная теплоемкость, $c_p(T) \cdot \rho(T)$, Дж/(м ³ ·°С)	Литература
$2 - 0,2451 \frac{T}{100} + 0,0107 \left(\frac{T}{100} \right)^2$	$\rho(T) \cdot 900$ при $20 \text{ °С} \leq T \leq 100 \text{ °С}$, $\rho(T) (900 + (T - 100))$ при $100 \text{ °С} < T \leq 200 \text{ °С}$, $\rho(T) (1000 + 0,5(T - 100))$ при $200 \text{ °С} < T \leq 400 \text{ °С}$, $\rho(T) \cdot 1100$ при $400 \text{ °С} < T \leq 1200 \text{ °С}$	[3]

Таблица 3 – Условия конвекционного и радиационного теплообмена

Характеристика	Единица измерения	Величина	Литература
Коэффициент конвекционного теплообмена на обогреваемой поверхности	Вт/(м ² ·К)	29	[1]
Коэффициент конвекционного теплообмена на необогреваемой поверхности		6	
Степень черноты	–	0,67	
Постоянная Стефана-Больцмана	Вт/(м ² ·К ⁴)	$5,67 \cdot 10^{-8}$	

Для отработки процедур уточненного расчетного метода определения огнестойкости железобетонных конструкций была выбрана преднапряженная ребристая железобетонная плита, конструктивная схема которой показана на рис. 1.

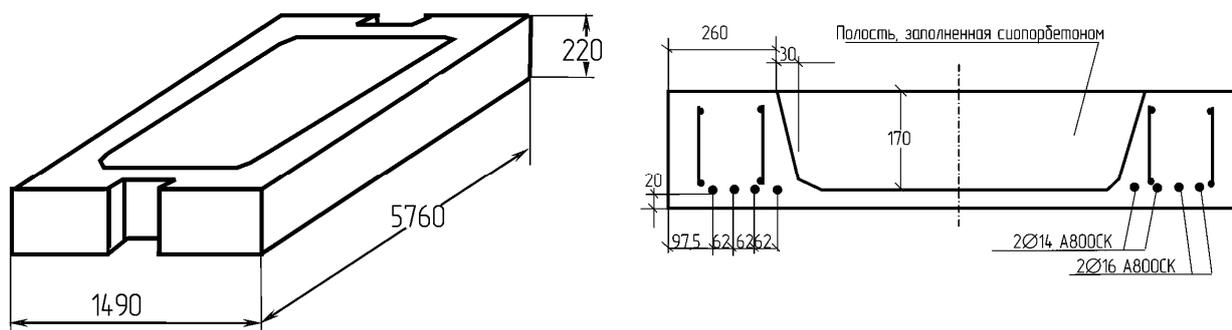


Рисунок 1 – Конструктивная схема железобетонной плиты.

Рисунок 1 – Конструктивная схема железобетонной плиты

На верхней поверхности плиты нанесен слой сиопорбетона толщиной 50 мм и цементная стяжка толщиной 30 мм. Нижняя поверхность оштукатурена гипсоизвестковым покрытием «МИП» толщиной 5 мм.

Для наиболее точного воспроизведения воздействий и граничных условий при испытаниях необходимо, чтобы были удовлетворены следующие требования к модели:

1. Предварительное напряжение осуществляется без вклада в жесткость плиты материала в ее полости.
2. После предварительного напряжения плиты должна быть приложена нормативная нагрузка и затем приложена температурная узловая нагрузка с учетом жесткости материала в полости плиты.
3. Плита является статически определимой, опирание необходимо осуществлять на опорную пластину, а на нее устанавливать соответствующую принятым граничным условиям опору во избежание появления преждевременных трещин в месте закрепления.
4. В месте опирания установить фрикционное контактное взаимодействие.
5. Для улучшения сходимости и убыстрения расчета рассмотреть $\frac{1}{4}$ часть плиты в полсечения и в полпролета.

На первом этапе для формирования комплекса нагрузок и граничных условий, моделирующих условия испытаний, необходимо решить теплотехническую задачу. Теплотехническая задача решалась при помощи квазилинейного уравнения Фурье, аппроксимированного при помощи МКЭ, с граничными условиями (ГУ), которые указаны в табл. 2 и 3, и конечно-элементной модели, показанной на рис. 2.

На рис. 3 показаны результаты решения теплотехнической задачи для данной плиты в виде температурных распределений.

Второй этап расчета осуществлялся в три стадии. На первой стадии воспроизводилась особенность моделирования технологического НДС при перераспределении напряжений после бетонирования и формирования предварительного напряжения в плите с учетом собственного веса плиты. При данном расчете жесткость и вес конечных элементов (КЭ) опорных поверхностей грузовых балок, сиопорбетона, цементной стяжки отключались опцией «рождение и смерть КЭ» при отсутствии внешних нагрузок. На второй стадии включались жесткости и вес отключенных ранее КЭ, прикладывалась действующая механическая нагрузка и рассчитывались параметры НДС. На третьем этапе к узлам КЭ-модели прикладывались узловые температуры, полученные путем интерполяции, для каждой минуты испытаний из результатов решения теплотехнической задачи. Для каждого момента времени рассчитываются параметры НДС. На рис. 4 показана конечно-элементная модель для решения прочностной задачи. Данная задача решалась при помощи МКЭ-системы ANSYS Multiphysics.

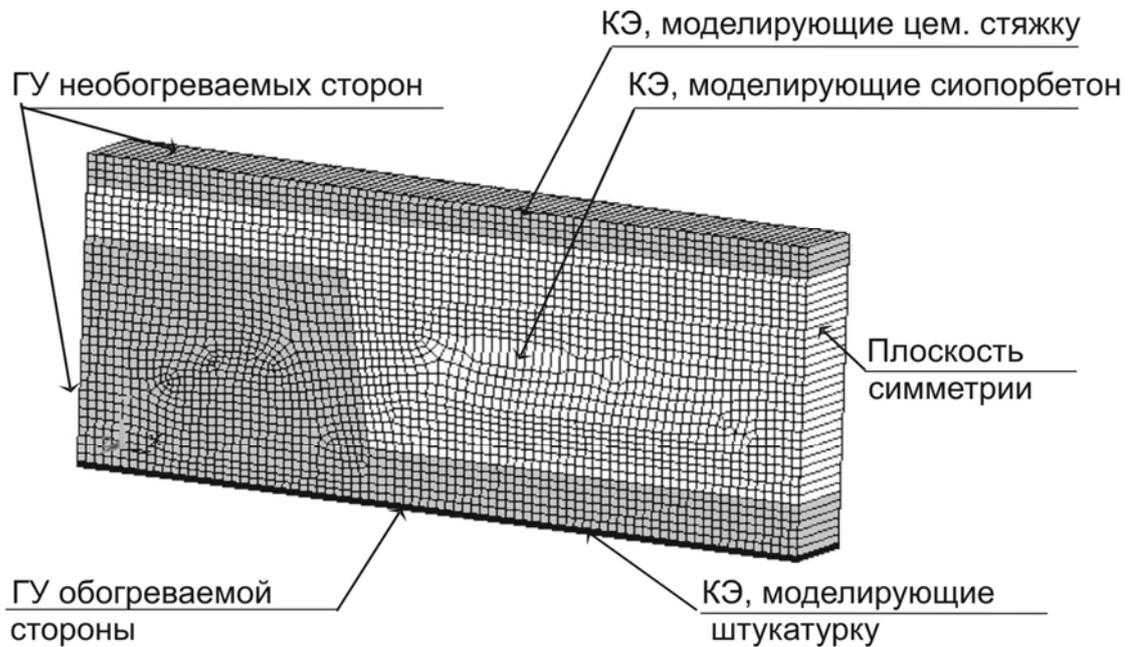
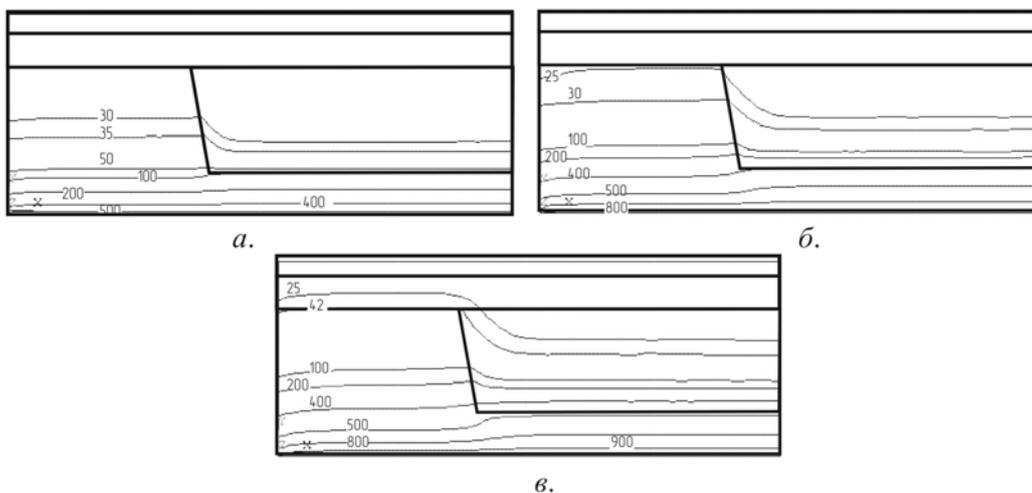


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель железобетонной плиты для решения теплотехнической задачи



Моменты времени: *а* – 30 мин, *б* – 60 мин, *в* – 90 мин

Рисунок 3 – Температурные распределения (°С) в сечении предварительно напряженной ребристой железобетонной плиты для моментов времени

На рис. 5 показаны расчетные кривые максимального прогиба для двух образцов-плит, подвергнутых огневому испытанию. Расчеты проведены с использованием диаграмм деформирования, построенных на базе математических моделей механических свойств бетона и арматурной стали Eurocode 2 EN 1992-1-2:2004 [3].

Графики на рисунке 5 показывают высокую эффективность применения уточненных методов расчета для моделирования поведения железобетонной плиты в условиях натуральных огневых испытаний. Огнестойкость плиты определялась путем построения касательных к графикам прогиба в месте их загиба при образовании пластического шарнира в плите. В табл. 4 показаны определенные пределы огнестойкости.

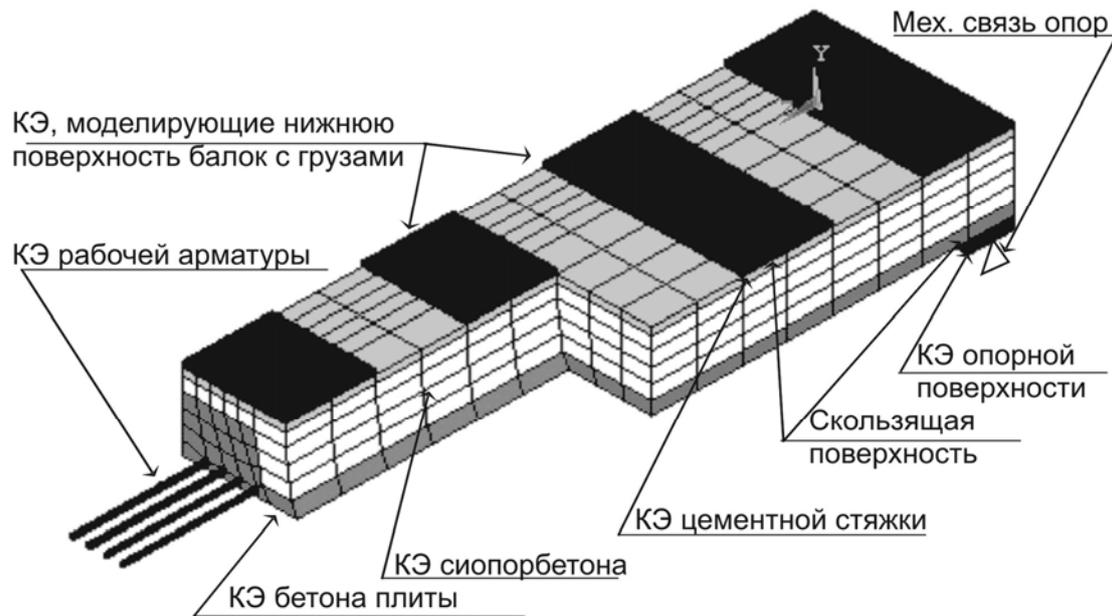
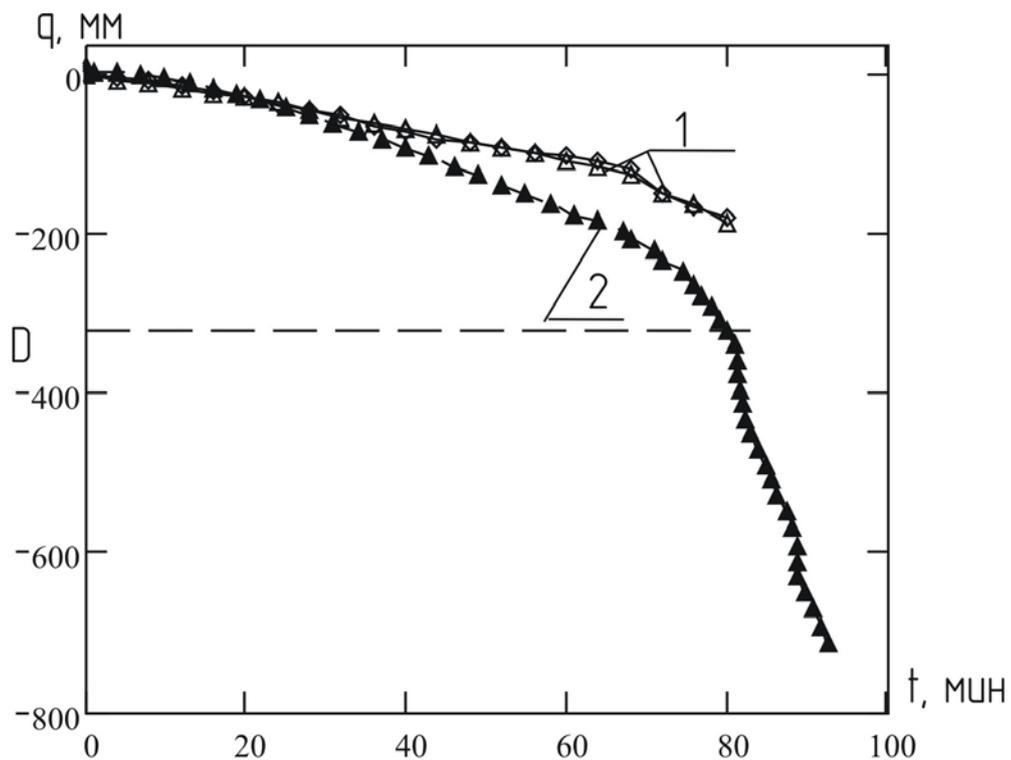


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель железобетонной плиты для решения теплотехнической задачи



1 – плиты № 1 и № 2 при натуральных огневых испытаниях;
2 – расчетные результаты, полученные на основе базовых математических моделей свойств бетона и арматурной стали Eurocode 2 EN 1992-1-2:2004

Рисунок 5 – Графики максимального перегиба предварительно напряженной ребристой железобетонной плиты при испытаниях на огнестойкость

Таблица 4 – Расчетные значения пределов огнестойкости предварительно напряженной ребристой железобетонной плиты

Метод определения предела огнестойкости	U , мин
Огневые испытания (плита № 1)	67
Огневые испытания (плита № 2)	69
Eurocode 2 EN 1992-1-2:2004 [3]	80

Для оценки адекватности полученных данных был проведен анализ, результаты которого приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты анализа адекватности результатов расчета НДС преднапряженной ребристой плиты

Параметр	Единицы измерения	Максимальное абсолютное отклонение	Среднее относительное отклонение, %	Среднеквадратичное отклонение
Максимальный прогиб	мм	173	25	97
Температура в арматуре	°С	120	15	75
Предел огнестойкости	мин	13	22,1	–

Выводы

1. В результате проведенных исследований был рассчитан предел огнестойкости предварительно напряженной ребристой железобетонной плиты при помощи уточненного метода на базе МКЭ.

2. Выделены наиболее эффективные математические модели поведения железобетона при высокотемпературном нагреве для уточненных методов определения огнестойкости несущих железобетонных конструкций.

3. Исследована адекватность результатов, полученных при расчете; показано, что при высокой их правдоподобности они являются недостаточно точными для окончательного определения предела огнестойкости железобетонных конструкций, поскольку значение предела огнестойкости превышает экспериментальное значение на 13 мин.

4. Для увеличения точности получаемых пределов огнестойкости необходимо уточнять базовые диаграммы деформирования бетона и арматуры при помощи дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. МДС 21.2 -2000 : [Введ. в действие 01.01.2000]. – М., 2000. – 49 с. – (Нац. стандарт РФ).
2. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. СТО 36554501-006-2006 : – [Введ. в действие 01.01.1996]. – М., 2006. – 77 с. – (Нац. стандарт РФ).
3. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2 : Design of concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design. – Brussels, 2004. – 115 p.
4. ANSYS, version 13.0, User and Theoretical Manual, ANSYS, Inc., Southpointe, Canonsburg, Pennsylvania, USA : [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа : <http://www.ansys.com/Products/ANSYS+13.0+Release+Highlights>. – Дата доступа : 25.01.2010.
5. Wolanski, A.J. Flexural behavior of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis. / A.J. Wolanski. / A Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School, Marquette University. – Milwaukee : Wisconsin, 2004. – 87 p.

6. Мосалков, И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, А.Ю. Фролов. – М. : ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.
7. Сахаров, А.С. Метод конечных элементов в механике твердых тел / А.С. Сахаров [и др.] ; под ред. А.С. Сахарова, И.А. Альтенбаха. – К. : Вища школа, 1982. – 480 с.
8. Фомин, С.Л. Робота залізобетонних конструкцій при впливі кліматичного, технологічного і пожежного середовища: автореф. дис-ї на здоб. наук. ступеня докт. техн. Наук : спец. 21.06.02 «Пожежна безпека». / С.Л. Фомін. – Харків, 1997. – 38 с.
9. Lie, T.T. A Procedure to Calculate Fire Resistance of Structural Members. / T.T. Lie // International Seminar on Three Decades of Structural Fire Safety, 22/23. – 1983. – P. 139–153.