

*к.т.н. Поздеев С.В.
(Академия пожарной безопасности
им. Героев Чернобыля МЧС Украины,
г. Черкассы, Украина)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

У статті подані результати експериментальних досліджень щодо поведінки бетону за високих температур нагріву та розроблена послідовність експериментальних та розрахункових процедур для визначення механічних характеристик бетону в умовах нагріву для застосування уточнених методів розрахунку меж вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій.

***Ключові слова:** залізобетонні конструкції, вогнестійкість, математичне моделювання, метод кінцевих елементів.*

В статье приведены результаты экспериментальных исследований поведения бетона при высоких температурах нагрева и разработана последовательность экспериментальных и расчетных процедур для определения механических характеристик бетона в условиях нагрева для применения уточненных методов расчета пределов огнестойкости железобетонных строительных конструкций.

***Ключевые слова:** железобетонные конструкции, огнестойкость, математическое моделирование, метод конечных элементов.*

***Постановка проблемы.** Применение методов математического моделирования для исследования поведения элементов железобетонных конструкций при пожаре связано с большими трудностями вследствие неоднородности и ярко выраженной нелинейности свойств железобетона, которые непрерывно меняются при его высокотемпературном нагреве. Данной проблеме посвящены многочисленные публикации [1], но, не смотря на большой объем научных исследований в данной области, очень важным представляется вопрос корректного применения математических моделей материалов и расчетных методик, описанных в нормативной документации. Развитию математических моделей механических свойств материалов посвящено большое количество исследований [1]. Тем не менее, в нормативных документах, например [2], даны рас-*

четные методики и математические модели свойств материалов, что обуславливает необходимость их применения для расчетов пределов огнестойкости железобетонных конструкций проектируемых зданий на практике. В связи с этим достаточно важным является развитие методологии для решения практических проектных задач, основанной на базовых нормативных документах с применением уточненных методов.

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, ЛИРА и др., в которых реализованы наиболее эффективные математические модели поведения материалов, учитывающие обширные научные данные зарубежных и отечественных исследователей. Тем не менее, опыт применения таких математических моделей и систем показывает, что при расчете появляется существенная погрешность при сравнении результатов с экспериментальными данными, что ставит под сомнение использование их как окончательные для определения предела огнестойкости. На наш взгляд данная погрешность связана с тем, что в нормах предложены универсальные модели, учитывающие феноменологию материалов только частично. Улучшить ситуацию возможно, корректируя их в соответствии с результатами дополнительных лабораторных испытаний после соответствующей математической обработки их результатов.

Анализ последних исследований и публикаций. Результатами исследований многочисленных работ [1 – 5] устанавливаются различные математические модели поведения бетона и арматурной стали в условиях нагрева при пожаре. Сравнительный анализ данных 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 [2]. Поэтому данные математические модели выбраны в качестве базовых.

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является разработка способа корректировки нормативной математической модели механических свойств бетона в условиях нагрева для получения адекватных результатов при использовании уточненных методов расчета пределов огнестойкости на базе МКЭ.

Математическая модель механических свойств бетона в условиях нагрева предназначена для построения набора диаграмм деформиро-

вания бетона при разных температурах и базируется на формулах:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{c1,T} \quad \sigma(\varepsilon) &= \frac{3\varepsilon_b R_{b,T}}{\varepsilon_{c1,T} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{c1,T}} \right)^3 \right)}, \\ \text{при } \varepsilon_{c1,T} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b2} \quad \sigma(\varepsilon) &= R_{b,T} - \frac{R_{b,T} (\varepsilon_b - \varepsilon_{c1,T})}{\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{c1,T}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varepsilon_{c1,T}$ – относительная деформация, до которой диаграмма деформирования имеет восходящую ветвь,

ε_b – относительная деформация бетона,

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

ε_{b1} – относительная деформация, до которой справедливо пропорциональное соотношение между деформацией и напряжением,

ε_{b2} – предельная относительная деформация.

Для корректировки математических моделей механических свойств моделей были проведены лабораторные исследования бетонных образцов в условиях нагрева и напряженно-деформированного состояния (НДС). Для проведения исследований была использована установка, для комбинированных испытаний состоящая из нагружающей системы и муфельной печи. Испытания проводились в следующей последовательности. Сплошные бетонные образцы диаметром 56 мм и 76 мм и высотой 200 мм нагружались до величин напряжений 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 от значения предела прочности на сжатие $R_{b,T}$. Предел прочности сжатия предварительно определялся для бетонных образцов путем испытаний без нагрева. Нагруженный образец подвергался нагреву в соответствии со средней кривой прогрева приарматурного железобетонных балок при защитном слое 30 – 40 мм. Каждый из экспериментов повторялся три раза. Параметрами, которые измерялись при испытаниях, были перемещения нижней губки гидравлического домкрата и развиваемое им давление. Результаты испытаний образца диаметром 76 мм и средним пределом прочности на сжатие $R_{b,T} = 37,5$ МПа показаны на рисунке 1.

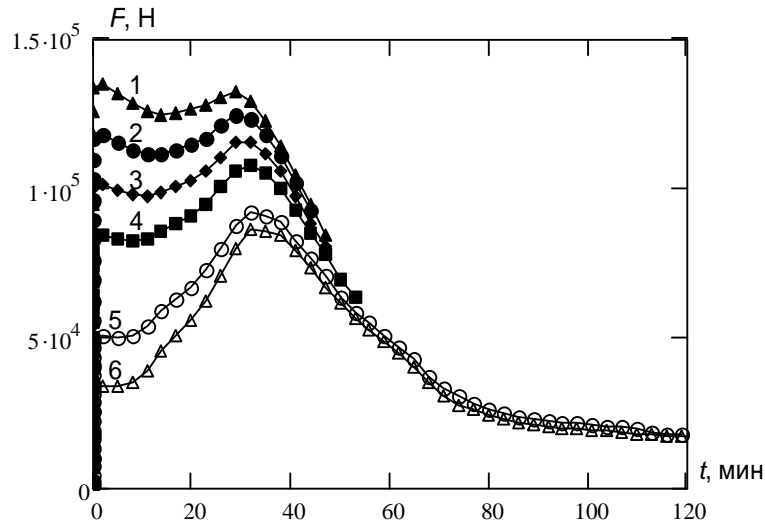


Рисунок 1 – Показания динамометра при испытании образцов, предварительно нагруженных до:
 1 – $0,8R_{b,T}$, 2 – $0,7R_{b,T}$, 3 – $0,6R_{b,T}$, 4 – $0,5R_{b,T}$, 5 – $0,3R_{b,T}$, 6 – $0,2R_{b,T}$

На рисунке 2 показаны диаграммы деформирования бетона в зависимости от температуры, построенные с использованием математической модели (1).

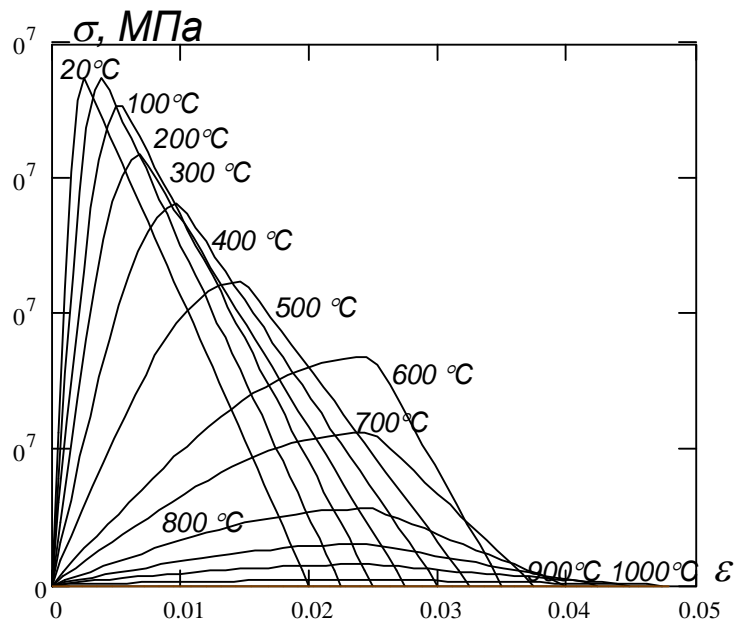


Рисунок 2 – Диаграммы деформирования бетона при разных температурах для бетона образцов согласно EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2

Анализ наиболее значимых параметров модели показал, что наибольшее влияние на результаты расчета оказывает предел прочности на

сжатия при разных температурах. Согласно EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [2] коэффициент работы бетона, определяющий прочность бетона на сжатие для данной температуры зависит от температуры как показано на рисунке 3.

Исследования показывают, что очень удобно аппроксимировать зависимость коэффициента работы бетона при помощи формулы:

$$\gamma_{bt} = \exp \left[a \left(\frac{T}{1100} \right)^b \right], \quad (2)$$

где a и b числовые коэффициенты, которые подлежат определению для уточнения параметров диаграмм деформирования бетона при высоких температурах.

Поиск коэффициентов формулы (2) осуществлялся при помощи минимизации целевого функционала вида:

$$\Phi = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_i (F_{Эi} - F_{Pi})^2}, \quad (3)$$

где $F_{Эi}$, F_{Pi} – соответственно экспериментально определенное и рассчитанное значение силы, прикладываемой к образцу, n – количество экспериментальных ситуаций.

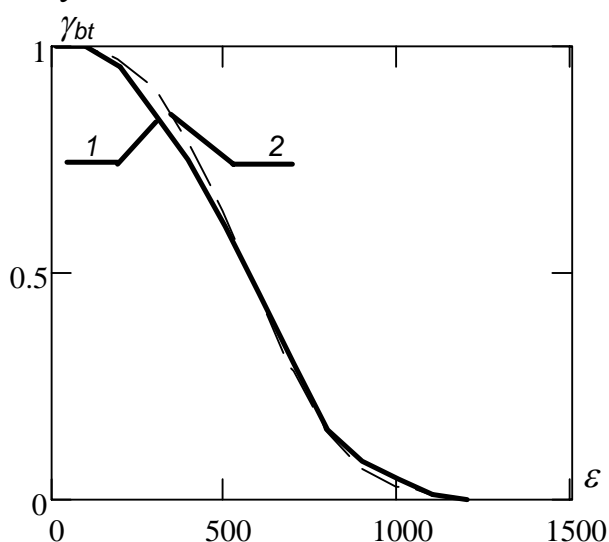


Рисунок 3 – Температурные зависимости коэффициента работы тяжелого бетона на гранитном заполнителе при высоких температурах:
 1 – согласно EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2;
 2 – аппроксимирующая кривая согласно формуле (2)

Решение прямой задачи осуществлялось в такой последовательности. Решалась теплотехническая задача при расчете температурных полей в образце. Для расчета температурных полей в образце были использованы данные [7] и плоская КЭ модель. Параметры модели представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры математической модели для расчета температурных распределений в бетонном образце при комбинированных испытаниях

№, п/п	Базовая модель	Метод
1	Разрешающие уравнения	Базовые МКЭ для уравнения Фурье в комбинации с методом Ньютона-Рафсона
2	Теплофизические характеристики	Eurocode 2 EN 1992-1-2: 2004
3	Граничные усл.: степень черноты	0,67-0,000417 T

На рисунке 4 показана конечно-элементная модель образца для расчета температур.

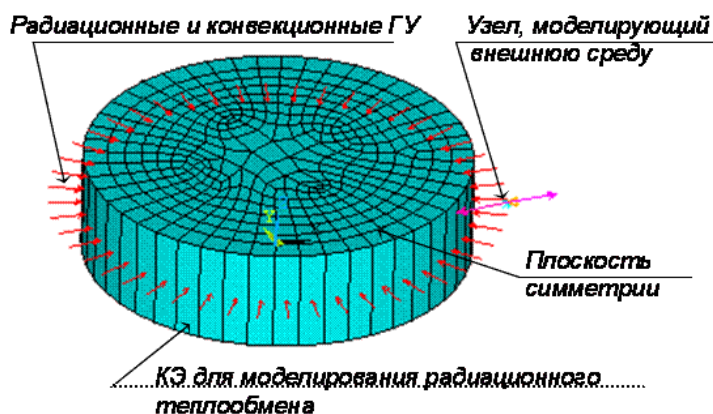


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель бетонного образца для определения температурного распределения при комбинированных испытаниях

Полученные узловые температуры интерполировались на КЭ-модель прочностного расчета, показанную на рисунке 5. При расчете напряженно-деформированного состояния (НДС) в образце воспроизводилась история нагружения. Сначала прикладывалась сжимающая нагрузка, а потом в качестве нагрузки в узлах модели прикладывались рассчитанные температуры.

Для расчета силы применялись базовые математические модели НДС бетона, сведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Основные расчетные математические модели НДС железобетона

№, п/п	Особенность поведения железобетона	Используемая математическая модель (метод)	Автор	Источник
1.	Базовые уравнения НДС	Разрешающие уравнения МКЭ		[3 – 6]
2.	Пластическое деформирование бетона	Многослойная модель ассоциативной теории пластического течения	Besseling	[6]
3.	Трещинообразование	Составной критерий прочности бетона	Willam, Warnke	[3, 4, 6]
4.	Физическая и геометрическая нелинейность поведения с учетом ортотропии свойств, обусловленной наличием трещин.	Итеративный метод	Newton, Raphson	[3 – 6]

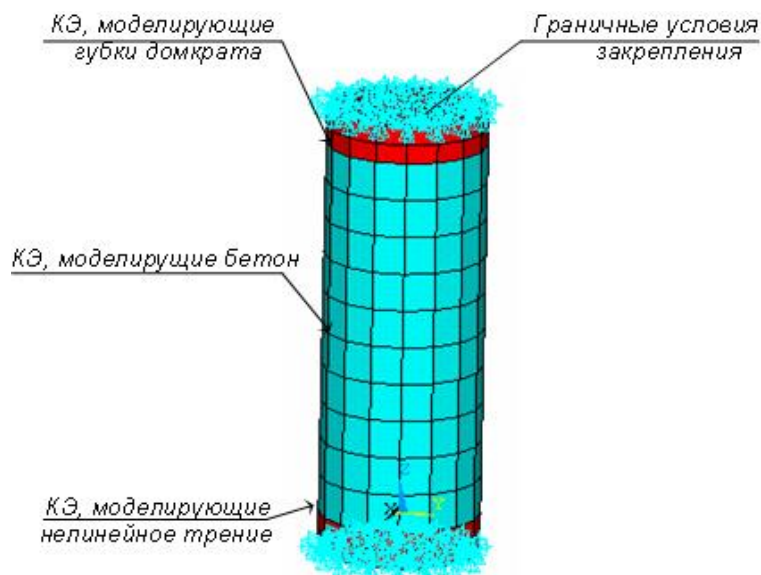


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель бетонного образца при решении структуральной задачи

Результаты решения прочностной задачи для диаграмм согласно EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [2] показаны на рисунке 6.

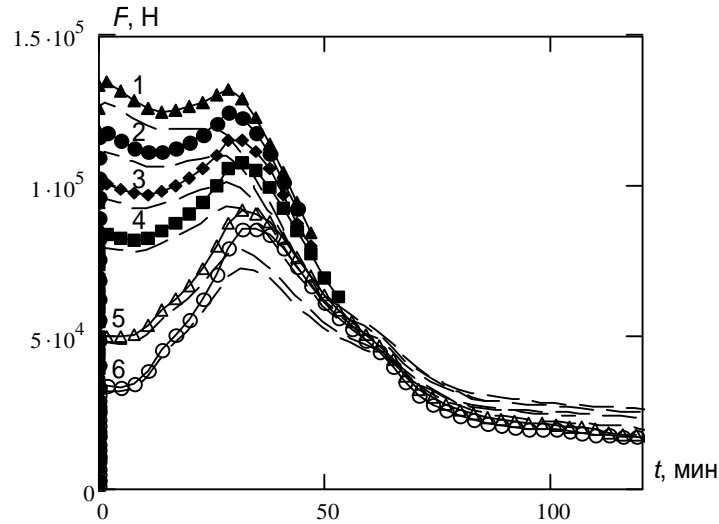


Рисунок 6 – Результаты расчета для образца в условиях нагрева под нагрузкой (пунктирные линии):

1 – $0,8R_{b,T}$, 2 – $0,7R_{b,T}$, 3 – $0,6R_{b,T}$, 4 – $0,5R_{b,T}$, 5 – $0,3R_{b,T}$, 5 – $0,2R_{b,T}$

На рисунке 6 видно, что результаты расчета имеют существенные отклонения от экспериментальных данных.

Используя построенные КЭ-модели был проведен расчет по минимизации функционала (3) при варьировании параметров a и b формулы (2), в результате чего были определены их оптимальные значения $a = 9,8$ и $b = 4,5$. С использованием откорректированных диаграмм деформирования бетона при помощи проведенных экспериментальных и расчетных процедур получены результаты, которые приведены на рисунке 7.

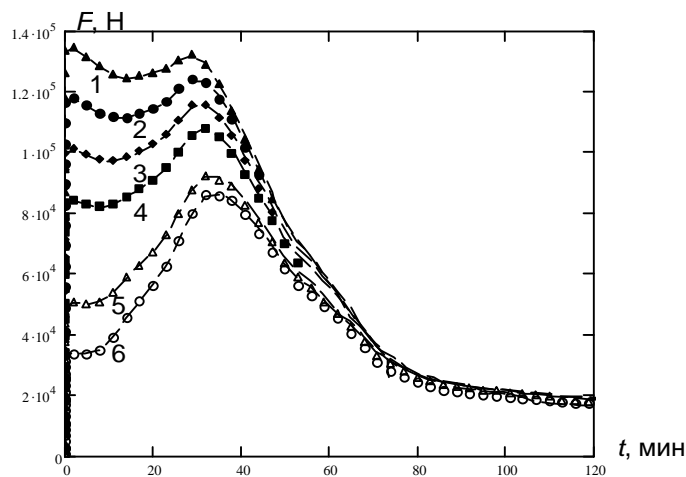


Рисунок 7 – Результаты расчета для образца в условиях нагрева поднагрузкой (пунктирные линии) после оптимизации параметров диаграмм деформирования бетона:

1 – $0,8R_{b,T}$, 2 – $0,7R_{b,T}$, 3 – $0,6R_{b,T}$, 4 – $0,5R_{b,T}$, 5 – $0,3R_{b,T}$, 5 – $0,2R_{b,T}$

Выводы. В результате проведенных исследований показана эффективность применения диаграмм деформирования бетона, которые рекомендуются в стандарте EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [2], откорректированных в результате предложенных экспериментальных и расчетных процедур, для моделирования напряженно-деформированного состояния бетонного образца в условиях лабораторных испытаний нагрева под нагрузкой.

Библиографический список

1. Мосалков И.Л. *Огнестойкость строительных конструкций* / Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.

2. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.

3. Клованич С.Ф. *Метод конечных элементов в механике железобетона : [монография]* / Клованич С.Ф., Мироненко И.Н. – Одесса: ОНМУ, 2007. – 110 с.

4. Карпенко Н.И. *Определяющие соотношения для железобетона с трещинами при термосиловых воздействиях* / Карпенко Н.И., Клованич С.Ф. // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 1983. – №2. – С. 141 – 165.

5. *Метод конечных элементов в механике твердого тела* / Сахаров В.С., Кислокий В.Н., Киричевский В.Р. и др. – К.: Вища школа, 1982. – 480 с.

6. [ANSYS Release 10, Inc. Theory Reference.](#)

7. Поздеев С.В. *Обоснование методики расчета температурных режимов прогрева камеры печи при комбинированных испытаниях бетонных образцов* / Поздеев С.В., Григорян Б.Б., Некора О.В., Поздеев А.В. // *Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки*. – К.: УкрНДІПБ, 2006. – № 2 (14). – С.140–147.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.