

**ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ  
И СООРУЖЕНИЙ**

**Фомин С.Л.**

*Харьковский национальный университет строительства  
и архитектуры, г. Харьков, Украина*

По заказу Минрегионстроя Украины ГП ГНИИСК при участии ХНУСА разработаны национальные стандарты по проектированию строительных конструкций, гармонизированные с европейскими стандартами группы А (Еврокоды).

Директива Совета Европейского объединения от 3 декабря 1988 года установила требования для сближения законов, постановлений, распоряжений стран-членов СЕ в области строительства. По строительной продукции (СПД) включает 6 существенных требований: 1- механическое сопротивление и устойчивость; 2 - противопожарная безопасность; 3 - гигиена, здоровье, окружающая среда; 4 - надежность эксплуатации; 5 - шумозащита; 6 - экономии энергии и защита от потерь тепла.

Соответственно этим требованиям разработаны Еврокоды, которые касаются проектирования и изготовления строительных конструкций (категория А). По рейтингу приоритетов на втором месте стоит требование обеспечения противопожарной безопасности, в связи с чем в Еврокодах 2,3,4,5,6 и 9 разработаны отдельные тома - части 2. Например, EN-Eurocode 2 : design of concrete structures - Part 1-2: - Structural fire design (Еврокод 2: Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-2: Общие требования. Огнестойкость) [2].

К настоящему времени разработаны, изданы и введены в действие с 1 июня 2011 г. с отменой в Украине СНиП 2.03.01-84\* государственные строительные нормы Украины ДБН В.2.6-98:2009 «Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення» [3], и национальный стандарт Украины ДСТУ Б В.2.6-156:2010 «Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування» [4], в которых учтены основные положения (принципы) EN 1992-1-1:2005 Еврокод 2: «Проектування залізобетонних конструкцій – Частина 1-1: Загальні норми і правила для споруд» [1].

По второму, наиболее важному пункту требований директивы (СРД) - противопожарной безопасности произведена гармонизация национального стандарта Украины ДСТУ-Н П Б В.2.6-XX: 20XX «Конструкції будинків і споруд. Проектування залізобетонних конструкцій. Основні положення. Вогнестійкість» [5] со второй частью EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2.

Нагрузки и воздействия во время пожара задаются по ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 [6], гармонизированным с (EN 1991-1-2:2002, IDT)».

Практическая проблема – образование. Исторически сложилось так, что в СССР важнейшая часть нормативных документов, касающаяся обеспечения механического сопротивления и устойчивости железобетонных конструкций при воздействии пожара была разработана во Всесоюзном научно-исследовательском институте противопожарной обороны (ВНИИПО), в Высшей школе МВД СССР и в НИИЖБе. В нашей стране организован Украинский НИИ пожарной защиты МЧС и три ВУЗа: Национальный университет гражданской защиты в г. Харькове, Академия пожарной безопасности им. Героев Чернобыля в г. Черкасах и Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности, которые занимаются научной работой, подготовкой курсантов и специалистов высшей квалификации по специальности 21.06.02- пожарная безопасность.

В паспорте специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения в п.2 предусматривается изучение особенностей воздействий окружающей среды и разработка методов защиты от влияния техногенных условий, в п.5 – разработка методов оценки несущей способности конструкций, защита от различных видов физических повреждений и в п.7 указаны направления исследований в части создания теоретических основ и методов строительства, направленных на разработку рациональных решений, исходя из защиты человека от температурных и других неблагоприятных воздействий. Поэтому в экспертном совете по этой специальности рассматриваются диссертации по огнестойкости строительных конструкций.

С образованием в ВУЗах дело обстоит иначе. В типовых учебных программах «Проектирование конструкций зданий и сооружений» для студентов специальности 7.06010101 «Промышленное и гражданское строительство» предусмотрена 2-х часовая тема «Железобетонные конструкции, предназначенные для условий работы при повышенных и высоких температурах», однако курс «Огнестойкость» отсутствует. Читают этот курс только в двух строительных ВУЗах - в Национальном университете «Львівська політехніка» и ХНУСА. Опрос проектных организаций показывает, что их персонал не владеет навыками расчета

и проектирования строительных конструкций с учетом пожара. А ведь проектирование здания начинается с определения степени его огнестойкости, по которой назначаются классы огнестойкости отдельных конструкций, определяющие период времени, в течении которого должна быть обеспечена их несущая способность при пожаре.

В предисловии авторов к руководству для проектировщиков по Еврокоду 2:EN 1992-1-2 [7] отмечается, что многие инженеры-строители Великобритании незнакомы с принципами проектирования противопожарной защиты конструкций зданий и сооружений. В силу сложившейся традиции переход от предписывающих (prescribed) методов противопожарного проектирования строительных конструкций (fireengineering) к так называемым целеориентированным (performance-based) методам является реальной практической проблемой.

К теоретическим проблемам, во-первых, относится принцип назначения классов огнестойкости конструктивных элементов здания по степени его огнестойкости. Степень огнестойкости зданий и сооружений назначается по ДБН В.1.2-7:2008[8] и СНиП 31-01-2003 [9], СНиП 2.08.02-89 [10], СНиП 2.09.04-87 [11], СНиП 31-03-2001 [12] в зависимости от назначения здания, категории взрывопожарной и пожарной безопасности, высоты, площади этажа в пределах противопожарного отсека.

Затем для выбранной степени огнестойкости здания по таблице 4 ДБН В.1.1-7-2002 [13] принимаются классы огнестойкости - минимальные пределы огнестойкости по новому ряду (30; 60; 90; 120; 180; 240 мин) для трех предельных состояний (R-прочность, E-целостность и I-тепловая изоляция) строительных конструкций (стен, колонн, перекрытий и др). Таким образом, конструкция должна обладать механическим сопротивлением и устойчивостью не только при нормальной температуре, но и на протяжении заданного времени - предела огнестойкости. В настоящее время нет четких критериев назначения пределов огнестойкости в соответствие с новым рядом классов.

Кроме того, проблема состоит в том, что для заданной степени огнестойкости здания разным ее элементам присваиваются различные классы. Например, для 1-й степени огнестойкости несущие стены имеют класс R150, самонесущие – R75, колонны - R150, межэтажные перекрытия - R60. При решении конкретной задачи, например, определения огнестойкости безбалочного перекрытия монолитного здания, рассматривая фрагмент плиты с учетом колонн верхнего и нижнего этажей, сталкиваемся с противоречием задания расчетного времени для определения температурного поля в сечении элементов. При таком подходе невозможно оценить огнестойкость колонны, поскольку к 150

мин перекрытие класса R60 уже не будет существовать. Поэтому, если речь идет о перекрытии, выбираем  $t_{fi, requ} = 60$  мин, учитывая принятый в ДСТУ новый ряд пределов огнестойкости. Проводим температурный анализ путем решения нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности, либо, используя графики, если таковые имеются, для времени  $t = 60$  мин находим нелинейное распределение температуры в плите заданной толщины. Для нагретых с четырех граней колонн нижнего этажа заданных размеров определяем температурные кривые по приложению А ДСТУ [5] для R60. По этим данным решаем статическую задачу определения огнестойкости плиты. Для проверки огнестойкости колонны в фрагменте конструкции оказывается недостаточность данных.

В процессе разработки новых нормативных документов выявлены неточности, несоответствия ряда положений в отечественных и гармонизированных стандартах, недостающие звенья в программных комплексах, общей концепции обеспечения надежности зданий и сооружений при нормальной температуре и испытывающих огневые воздействия при пожаре.

Проблематичен альтернативный подход к методикам расчета, который в ДСТУ [5] и в гармонизированных Еврокодах представлен в виде блок-схемы, в которой предусмотрены три метода расчета огнестойкости железобетонных конструкций: 1) анализ отдельной конструкции, 2) анализ части конструктивной системы и 3) общий анализ конструктивной системы.

В первом методе каждая конструкция рассматривается отдельно. Косвенные огневые воздействия не учитываются, за исключением тех, которые являются результатом перепада температур. Приведены табличные данные только для стандартного температурного режима. Применяются упрощенные методы и модели, учитывающие изменение свойств материалов. Уточненные модели расчета приведены только основными положениями.

Во втором методе при анализе части конструктивной системы учитываются косвенные огневые воздействия в узле, но не зависящие от времени взаимодействия с другими частями конструктивной системы. Табличные данные не применяются. Применяются упрощенные методы для стандартного и параметрического температурного режима, температурные кривые приведены только для стандартного температурного режима. По уточненным моделям расчета приведены только основные положения.

В третьем методе проводится анализ всей конструктивной системы. Рассматриваются косвенные огневые воздействия на всю конструктив-

ную систему. Табличные данные не применяются. Упрощенные методы не применяются. Приведены только основные положения уточненной модели расчета.

Приведенные методики имеют разную степень достоверности и не могут обеспечить гарантированную надежность пожарной безопасности зданий и сооружений, хотя каждая из них имеет свою научную и практическую ценность. Б. Бартелеми и Ж. Крюппа отмечают, что «эти методы, разработанные на основе экспериментальных исследований, касаются лишь частных случаев, а их простота оплачивается недостаточно обеспеченной безопасностью. В частности, в них не учитывается напряженное состояние конструкций, поэтому предлагается использовать главным образом общий (третий) метод проверки» ([14] стр. 78).

Концепция нормирования пределов огнестойкости «ДБН В.1.2-7» [8], в которой по заданной степени огнестойкости здания принимаются минимальные пределы огнестойкости отдельных конструкций, является необходимым, но недостаточным условием для гарантии надежности здания в целом.

На основе проведенных в ХГТУСА экспериментальных и теоретических исследований выявлен механизм перехода железобетонных конструкций в предельное состояние при нагреве и необходимость учета косвенного влияния пожара (п.1.5.7 [2]) в виде дополнительных температурных усилий  $S_{\theta}$ , возникающих от сдерживания температурных деформаций элемента связями (соседними конструкциями), которые, накладываясь на усилия от нагрузки  $E_{fi,d,t}$ , снижают предел огнестойкости по сравнению с расчетом по первому методу.

Собственные температурные напряжения  $\sigma_{\theta}$ , возникающие при нелинейном распределении температуры по сечению железобетонных элементов, также влияют на несущую способность  $R_{fi,d,t}$ , увеличивая или снижая ее в зависимости от формы температурного поля.

Результаты расчета рамных статических неопределимых железобетонных конструкций, а также результаты экспериментальных и натуральных исследований показывают, что предельное состояние может возникнуть задолго до снижения несущей способности элементов при нагревании  $R_{fi,d,t}$ . Причиной этого является накопление температурных деформаций элементов, перераспределение усилий в результате образования пластических шарниров, потеря прочности элементов, не подверженных нагреву [15].

Наивысшую достоверность можно получить только третьим методом расчета с использованием нелинейных компьютерных моделей.

В этой связи разработана методика расчета огнестойкости монолитных зданий с безригельными каркасами, основываясь на анализе

всей конструктивной системы, когда любая или только одна из ее частей находится под влиянием пожара [2]. Методика расчета основана на учете реальных законов деформирования при нагревании, собственных температурных напряжений в бетоне и арматуре, перераспределения усилий в статически неопределимых конструкциях и ориентирована на использование компьютерных технологий, например, нелинейных методов ПК Лиры.

Этапы расчета включают выбор соответствующих проектных сценариев пожара, определение соответствующих проектных пожаров, расчет повышения температуры в строительных конструкциях и расчет механической работы конструктивной системы в условиях пожара.

При рассмотрении здания целиком, основываясь на анализе всей конструктивной системы, следует учитывать то обстоятельство, что при прочих равных условиях расчетная (фактическая) огнестойкость  $t_{fi,d}$  одинаковых конструктивных элементов изменяется в зависимости от местоположения очагов пожара [15]. Это происходит в результате изменения величины расчетного загрузочного эффекта  $E_{fi,d,t}$  в процессе пожара для момента времени  $t$  (косвенное влияние пожара). Пока не разработана методика оценки надежности пожарной безопасности, представляется целесообразным проводить вариантное проектирование с учетом назначения местоположения очагов пожара, основанного на ограниченном опыте и инженерной интуиции.

Численные исследования показали, что применение мощного аппарата метода конечных элементов в линейной постановке не позволяет произвести оценку предельного состояния железобетонных плит при совместном воздействии нагрузки и температуры из-за отсутствия критериев его появления. Необходим учет физической нелинейности материалов. ПК ЛИРА дает возможность проводить численное моделирование нелинейных загрузок, в результате которого выявляется картина разрушения, отображается направление развития трещин для каждого элемента.

Создание конечно-элементной расчетной схемы для нелинейного расчета может осуществляться по двум вариантам. Первый, наиболее простой, предполагает применение физически нелинейных универсальных стержневых конечных элементов КЭ210 для колонн и физически нелинейных универсальных прямоугольных КЭ241 оболочки (и/или треугольных КЭ242 оболочки) для перекрытия. Второй вариант более сложный, но более точный, основан на использовании физически нелинейных пространственных конечных элементов, например, физически нелинейных универсальных пространственных восьмиугольных изопараметрических КЭ236.

Для проведения температурного анализа в ДСТУ [5] приведены расчетные температурные кривые для плит, балок, колонн и стен с односторонним огневым воздействием (приложение А). Для плит полная информация отсутствует. В данный момент в качестве временного приложения можно рекомендовать графики, составленные ВНИИПО для тяжелых бетонов на силикатном и карбонатном заполнителях для унифицированного ряда высот сечения 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 и 200 мм и представленные в СТО 36554501 - 006-2006 [16].

Расчет температурных усилий в конструкциях с использованием программных комплексов проводится при условии линейного распределения температуры по сечению элементов и задании для КЭ стержневых элементов температуры на верхней  $t_1$  и нижней  $t_2$  поверхности, для КЭ пластин, плит, оболочек - средней температуры  $T_1 = (t_1+t_2)/2$  и температурного перепада на противоположных поверхностях элементов по заданному направлению  $T_2 = t_1-t_2$ . При нелинейном распределении температуры в сечении элемента возникают собственные температурные напряжения, которые влияют на общие температурные деформации плоского сечения. Потому эквивалентные температуры  $t_1$  и  $t_2$  необходимо определять с учетом этих напряжений. Другими словами, определяются эквивалентные температуры, соответствующие температурной кривизне при возникновении собственных температурных напряжений. Из этой линейной аппроксимации определяются граничные эквивалентные температуры  $t_1$  и  $t_2$ .

С помощью применения конечных элементов оболочечного типа даже с учетом физической нелинейности алгоритм расчета в шаговом процессоре для этих КЭ построен таким образом, что можно задавать 5 возможных слоев армирования, но только одного класса стали. Например, для армирующего материала можно задать экспоненциальную форму нелинейности, приняв модули упругости  $E_{s,\theta}$  и максимальный уровень напряжений  $f_{sy,\theta}$  уменьшенными с учетом нагрева на заданную температуру, но такая форма нелинейности будет распространяться на все возможные 5 слоев армирования. Другими словами, с помощью задания параметров нелинейности нельзя смоделировать различный нагрев по высоте нелинейного оболочечного элемента.

Для второго варианта при использовании физически нелинейных пространственных конечных элементов определение эквивалентной температуры не требуется. Плита перекрытия по высоте набирается из достаточного количества КЭ, в каждом из которых по результатам решения теплотехнической задачи задается постоянная температура, либо температурный перепад. Эти данные служат одновременно для

назначения прочностных и деформационных характеристик материалов и для определения температурных напряжений, усилий, деформаций.

При расчете огнестойкости железобетонных конструкций различают бетоны на силикатном (граниты, сиониты, диориты) и карбонатном (известняки, содержащие не менее 80% от веса бетона карбонатной составляющей) заполнителях.

Для проведения упругих и неупругих расчетов в программных комплексах требуются также значения модулей упругости сжатого  $E_{c,\theta}$  и растянутого бетона  $E_{tc,\theta}$ , деформаций  $\varepsilon_{c1,\theta}$ ,  $\varepsilon_{tc1,\theta}$ , соответствующих прочности на сжатие  $f_{c,\theta}$  и растяжение  $f_{tc,\theta}$ , предельных деформаций  $\varepsilon_{cu,\theta}$ ,  $\varepsilon_{tcu,\theta}$  и соответствующих им предельных напряжений  $\sigma_{cu,\theta}$  и  $\sigma_{tcu,\theta}$ .

Математическая модель диаграммы деформирования сжатого бетона при повышенных температурах в ДСТУ [5] представлена двумя частями: восходящая ветвь определяется формулой, на нисходящей ветви для расчета используются линейные или нелинейные модели без конкретизации их формы.

Параметры модели  $\varepsilon_{c1,\theta}$  и  $\varepsilon_{cu,\theta}$  для различных температур представлены в таблице 3.1 в зависимости от отношения прочностей нагретого и не нагретого бетона  $f_{c,\theta}/f_{ck}$ . Анализ этих данных, проведенный в работе [17], показал ошибочность значений  $\varepsilon_{cu,\theta}$ , выявил причины их возникновения и определил пути их устранения. Разработана методика определения критерия несущей способности бетона  $\varepsilon_{cu1,\theta}$  для расчета огнестойкости железобетонных конструкций зданий, на основе которой уточнены, приведенные в Еврокодах EN 1992-1-2:2004 и EN 1994-1-2:2005, данные о прочностных и деформационных свойствах бетона при повышенных температурах (разработана скорректированная таблица).

Процедура расчета содержит задание в каждом конечном элементе абсолютной или эквивалентной температуры, модулей упругости и расчетных сопротивлений бетона и арматуры, соответствующих их абсолютным температурам, определение жесткостей элементов путем задания закона нелинейного деформирования и при наличии арматуры в элементе, ее процента вдоль всех осей, моделирование нелинейных загрузений, состоящее в формировании их последовательности.

Разработанная методика расчета несущей способности конструкций и рабочих нагрузок в условиях пожара позволяет прогнозировать изменение состояния зданий, разработать сценарии опасных ситуаций с учетом различных комбинаций нагрева, разработать предложения по обеспечению необходимой огнестойкости.



## ***Выводы***

1. Рассмотрены основные проблемы теории и практики огнестойкости железобетонных конструкций зданий и сооружений. Выявлено, что реальной практической проблемой является недостаточная профессиональная подготовка инженеров-строителей в Украине и за рубежом. Важным в методическом плане является объединение в каждом из Еврокодов вопросов обеспечения механического сопротивления и устойчивости с противопожарной безопасностью (частей 1-1 и 1-2), что отразилось при их гармонизации в наших стандартах.

2. К проблемам теории относятся принцип назначения классов огнестойкости конструктивных элементов здания по степени его огнестойкости, вопросы надежности, альтернативный подход к методикам расчета, математические модели диаграммы деформирования бетона и арматуры при повышенных температурах, методики численного моделирования, температурного анализа и расчета механической работы конструктивной системы в условиях пожара.

3. Очерчены основные этапы методика расчета огнестойкости монолитных зданий, ориентированной на использование компьютерных технологий с учетом национальных стандартов, гармонизированных с европейскими стандартами группы А (Еврокоды), в результате использования которой выявлен ряд новых положений, поставлены задачи для совершенствования решения рассматриваемой проблемы в целом.

## **Summary**

The main problems of the theory - the principle purpose of fire resistance class, reliability issues, an alternative approach to the calculation method, the mathematical model of the strain diagram of concrete and reinforcement, methods of numerical modeling, thermal analysis and calculation of mechanical structural system in case of fire. It is revealed that the real problem is the lack of practical training for engineers in Ukraine and abroad.

## ***Литература***

1. EN 1992-1-1:2005 Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. (Еврокод 2: «Проектування залізобетонних конструкцій – Частина 1-1: Загальні норми і правила для споруд».)

2. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design (Еврокод 2: Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-2: Общие требования. Огнестойкость).

3. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків та споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. 2011. 71 с.
4. ДСТУ Б В.2.6-156:2010 Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Київ Мінрегіонбуд України. 2011-с.118.
5. ДСТУ-Н П Б В.2.6-XX: 20XX здания и сооружения. Проектирование железобетонных конструкций. Основные положения. Огнестойкость. (EN 1992-1-2:2004, MOD)
6. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 «Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-2. Общие воздействия. Воздействия на конструкции при пожаре (EN 1991-1-2:2002, IDT)»;
7. Леннон Т., Мур Д.Б., Ван Ю.К., Бейли К.Г. Руководство для проектирования к EN 1991-1-2, 1992-1-2, 1993-1-2, 1994-1-2: справочник по проектированию противопожарной защиты стальных, сталежелезобетонных и бетонных конструкций зданий и сооружений в соответствии с Еврокодами. Перевод с английского. МГСУ. Москва 2012.
8. ДБН В.1.2-7:2008 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель та споруд. Пожежна безпека. Київ. 2008.
9. СНиП 31-01-2003 Здания жилые многоквартирные.
10. СНиП 2.08.02-89 Общественные здания и сооружения.
11. СНиП 2.09.04-87 Административные и бытовые здания.
12. СНиП 31-03-2001 Производственные здания.
13. ДБН В.1.1-7-2002 Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Київ. 2003.
14. Бартлеми Б., Крюпа Ж. Огнестойкость строительных конструкций / Пер.с франц. М.В. Предтеченского; Под ред. В.В. Жукова. - М.: Стройиздат, 1985.-216с.
15. Фомін С.Л. Оцінка вогнестійкості багатопверхових каркасних будинків // Збірник наукових праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». Випуск 16, частина 1, Рівне: Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування. 2008. - С. 204-212.
16. СТО 36554501 - 006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. ФГУП НИЦ «Строительство» Москва 2006. - 81 с.
17. Фомин С.Л., Давиденко А.И., Поклонский В.Г. Уточнение параметров диаграммы "напряжение-деформация" бетона при повышенных температурах // Вісник Одеської Державної академії будівництва та архітектури. Випуск № 46.- Одеса: ОДАБА, 2012. - С.360-367.