

**УДК 624.012**

*С.В. Поздеев, канд. техн. наук доцент, нач. кафедры,  
АПБ им. Героев Чернобыля*

**ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ УТОЧНЕННОГО  
РАСЧЕТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛОВ  
ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

(представлено д-ром техн. наук Абрамовым Ю.А.)

В статье приведены результаты разработки методов верификации результатов расчета пределов огнестойкости железобетонных конструкций уточненными методами на базе моделирования их напряженно-деформированного состояния в условиях пожара.

**Ключевые слова:** предел огнестойкости, железобетонные конструкции, уточненный расчетный метод, верификация результатов.

**Постановка проблемы.** Для определения пределов огнестойкости несущих железобетонных строительных конструкций является перспективным использование расчетных методов на базе математического моделирования напряженно-деформированного состояния их элементов при пожаре. Данной проблеме посвящены многочисленные публикации [1], но, анализируя научные исследования в этом направлении, следует отметить то, что на данное время не существует четких упорядоченных методик для данных методов, а также подходы таких методов не учитывают технологических и эксплуатационных аспектов конкретных железобетонных конструкций. Кроме этого, при применении данных методов промежуточные результаты, полученные на каждом этапе расчета, должны подвергаться тщательному анализу их достоверности, а методы такого анализа разработаны недостаточно. При устранении указанных недостатков возможна полная, или частичная замена дорогостоящих и трудоемких огневых испытаний железобетонных конструкций на огнестойкость расчетными процедурами для их окончательной аттестации по огнестойкости при анализе пожарной безопасности широкого класса зданий и сооружений на стадиях проектирования, возведения и эксплуатации.

**Анализ последних исследований и публикаций.** При разработке уточненных расчетных методов важным представляется вопрос корректного определения свойств материалов. Современные нормы многих стран, таких как страны Евросоюза и Российская Федерация, наряду с упрощенными методами, что базируются на инженерных методиках расчета сопротивления материалов, рекомендуют приме-

нение уточненных расчетных методов, которые основаны на применении положений теории упругости, теории пластичности и теории разрушения. Тем не менее, в данных нормах нет четких рекомендаций относительно выбора базовых математических моделей поведения железобетона и численной реализации уравнений напряженно-деформированного состояния (НДС). Кроме этого, в нормативных документах, например [2, 3], даны четкие математические модели свойств материалов, что подразумевает необходимость их применения для расчетов пределов огнестойкости железобетонных конструкций при проектировании зданий и сооружений на практике, но данные модели не учитывают технологических и эксплуатационных особенностей материалов и конструкций. Также анализируя имеющийся опыт применения уточненных методов следует сказать, что отсутствует система верификационных процедур получаемых результатов [4] при их применении.

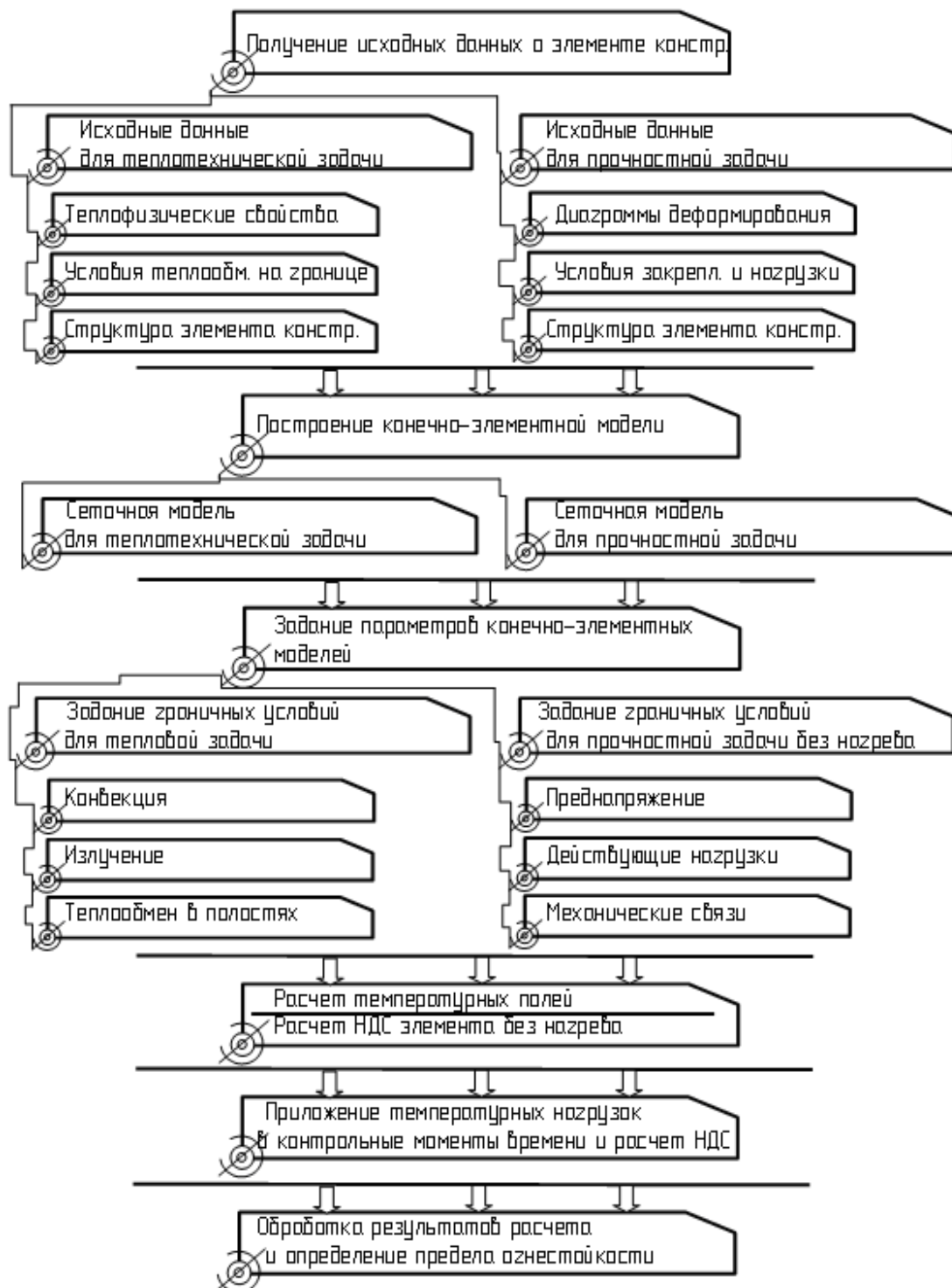
**Постановка задачи и ее решение.** Целью данной работы является разработка методов верификации результатов, полученных при применении уточненных расчетных методов определения пределов огнестойкости железобетонных строительных конструкций.

На основе анализа моделей силового сопротивления элементов железобетонных конструкций при механических и температурных нагрузках, которые, например, описаны в работах [4, 5], нами был предложен обобщенный инженерный подход к численной реализации уточненного расчетного метода определения пределов огнестойкости элементов несущих железобетонных конструкций при их работе в условиях огневого воздействия «стандартного» пожара. Разработанный комплекс методик и процедур, необходимых для осуществления разработанного уточненного расчетного метода определения пределов огнестойкости несущих железобетонных конструкций показан в виде структурной схемы на рис. 1.

При определении комплекса теплофизических и механических свойств бетона и арматурной стали предлагается экспериментально-расчетный метод, структурная схема которого показана на рис. 2. Согласно данной структурной схеме определение параметров температурных зависимостей теплофизических и механических свойств материалов производится посредством решения обратных задач идентификации по результатам лабораторных испытаний, которые решаются с помощью численных оптимизационных методов минимизации квадратичной невязки [5].

Для нахождения предела огнестойкости по несущей способности необходим расчет НДС элемента железобетонной конструкции в контрольные моменты времени развития пожара, определяемые через каждую 1 мин [5]. При реализации расчета рекомендуется ис-

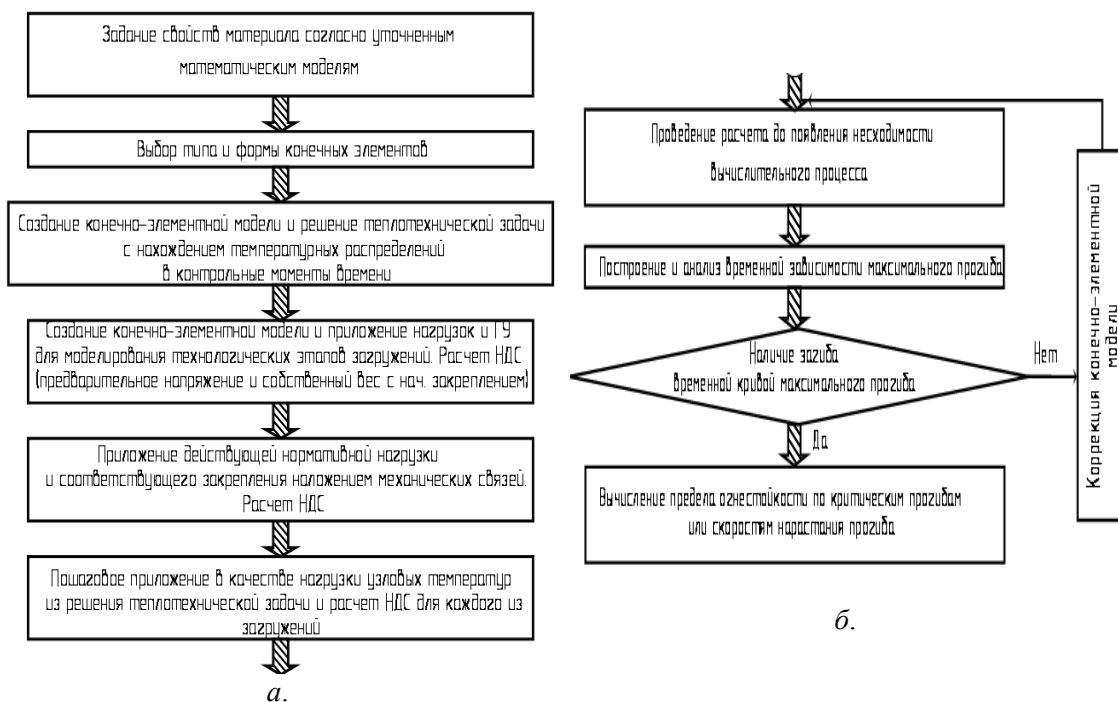
пользовать одну из компьютерных систем [5]. При определении предела огнестойкости рекомендуется использовать разработанную методику определения предела огнестойкости по рассчитанным параметрам НДС элемента в условиях пожара, схема алгоритма которой показана на рис. 3.



**Рис. 1 – Общая структурная схема уточненного расчетного метода определения огнестойкости стали несущих железобетонных конструкций**



**Рис. 2 – Структурная схема получения комплекса свойств бетона и арматурной стали в условиях нагрева экспериментально-расчетным методом**



**Рис. 3 – Структурная схема расчета напряженно-деформированного состояния элемента конструкции в условиях пожара (а) и алгоритм определения предела огнестойкости по полученным данным (б).**

Для определения пределов огнестойкости по полученным расчетным данным о НДС элементов железобетонных конструкций необходимо иметь определенный комплекс его параметров, которые

позволяют это сделать. В табл. 1 приведена структура расчетных данных НДС элементов в условиях пожара для осуществления разработанной методики определения предела огнестойкости при применении уточненного расчетного метода.

**Таблица 1 - Структура постпроцессорных данных для определения предела огнестойкости несущих железобетонных конструкций**

№, п/п	Определяемые данные	Необходимые результаты расчета
1.	Сценарий и причины разрушения элемента несущей железобетонной конструкции при пожаре	Распределение упругих, пластических, температурных относительных деформаций и напряжений. Распределение дефектов по пространству элемента
2.	Предел огнестойкости	Временные зависимости упругих, пластических, температурных относительных деформаций и напряжений, а также максимальных глобальных перемещений (прогибов)

Учитывая вышеизложенное был разработан метод верификации, основанный на поэтапной проверке получаемых предварительных и окончательных результатов расчета НДС элементов железобетонных конструкций в условиях пожара. Согласно положениям разработанного метода верификация результатов происходит при согласовании параметров, приведенных в табл. 2.

**Таблица 2 - Параметры, по которым проводится верификация предела огнестойкости несущих железобетонных конструкций по уточненному методу**

№, п/п	Параметр, по которому проводится верификация	Способ проведения верификации
1.	Время достижения в арматуре изгибаемых элементов критической температуры (~ 500 °С)	Сравнение времени достижения критической температуры в арматуре и предела огнестойкости (должны иметь близкие значения с откл. 10 – 15 мин).
2.	Предел огнестойкости, полученный одним из упрощенных методов	Сравнение пределов огнестойкости, полученной разными упрощенными методами (должны иметь близкие значения с откл. 10 – 20 %).
3.	Возникновение пластических деформаций в бетоне	Сравнение уровней нагрузок при достижении первых пластических деформаций в бетоне с результатами упрощенного расчета для данного предельного состояния (откл. 10 – 20 %).
4.	Возникновение первых трещин в растянутых слоях бетона.	Сравнение уровней нагрузок при достижении первых повреждений в бетоне с результатами упрощенного расчета для данного предельного состояния (откл. 10 – 20 %).
5.	Величина относительных температурных деформаций в бетоне и арматуре для данной температуры	Проверка соответствия величин температурной деформации бетона и арматуры законам температурных деформаций, установленных для заданного материала (откл. 10 – 20 %).

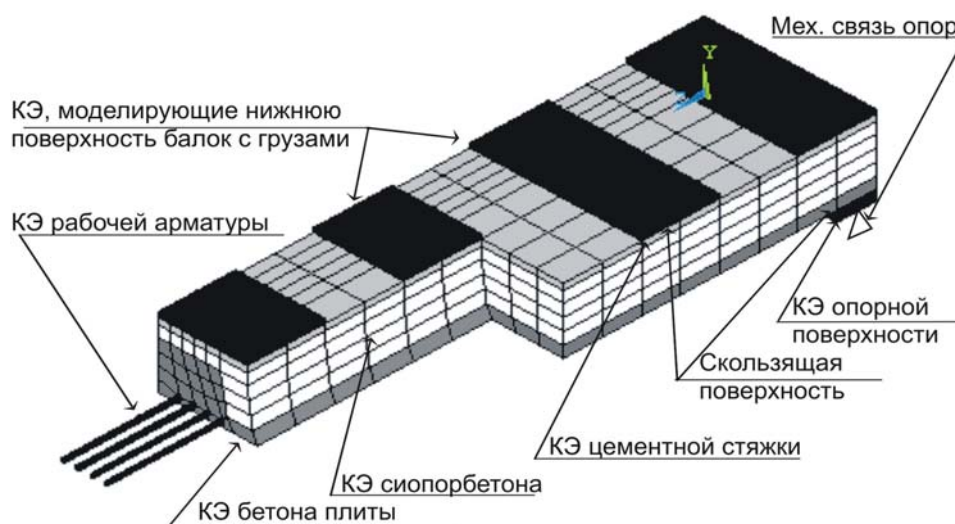


Рис. 4 – Конечно-элементная модель железобетонной плиты для решения теплотехнической задачи.

В табл. 3 показаны определенные пределы огнестойкости.

Таблица 3 - расчетные значения пределов огнестойкости предварительно напряженной ребристой железобетонной плиты

№ П/П	МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ	U, МИН
1.	ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ (ПЛИТА №1)	67
2.	ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ (ПЛИТА №2)	69
3.	EUROKODE 2 EN 1992-1-2: 2004 [8]	80
4.	УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД	75

Для оценки адекватности полученных данных был проведен анализ результаты которого приведены в табл. 4.

Таблица 4 - результаты анализа адекватности результатов расчета напряженно-деформированного состояния преднапряженной ребристой плиты

№, П/П	ПАРАМЕТР	ЕДИНИЦЫ ИЗМЕР.	МАКСИМАЛЬНОЕ АБС. ОТКЛ.	СРЕДНЕЕ ОТН. ОТКЛОНЕНИЕ, %	СРЕДНЕКВАДРАТ. ОТКЛ., ММ
<b>БАЗОВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВОЙСТВ EN 1992-1-2:2005 EUROCODE 2 [12]</b>					
	МАКСИМАЛЬНЫЙ ПРОГИБ	ММ	173	25	29
	ТЕМПЕРАТУРА В АРМАТУРЕ	°С	120	15	75
	ПРЕДЕЛ ОГНЕСТОЙКОСТИ	МИН	18	22,1	--
<b>УТОЧНЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВОЙСТВ</b>					
	МАКСИМАЛЬНЫЙ ПРОГИБ	ММ	185	16	5,58
	ТЕМПЕРАТУРА В АРМАТУРЕ	°С	54	4	23
	ПРЕДЕЛ ОГНЕСТОЙКОСТИ	МИН	5	7,5	--

В табл. 5 показаны результаты верификации результатов расчета, проведенные с использованием разработанного метода.

**Таблица 5 - Параметры, по которым проводится верификация предела огнестойкости несущих железобетонных конструкций по уточненному методу**

№, п/п	Способ проведения верификации	Результаты	
		Для свойств Eurocode 2	Уточненные модели
1.	Разница времени достижения критической температуры в арматуре и предела огнестойкости, мин.	14	9
2.	Отклонение пределов огнестойкости, от значений, полученными разными упрощенными методами, %.	12	15
3.	Отклонение величин нагрузок при достижении первых пластических деформаций в бетоне от результатов упрощенного расчета для данного предельного состояния, %.	17	9
4.	Отклонение величин нагрузок при достижении первых повреждений в бетоне от результатов упрощенного расчета, %.	19	5
5.	Отклонение величин температурной деформации компонентов от законов температурных деформаций, установленных для них в модели, %.	12	7

Согласно расчетам, проведенным для ребристой преднапряженной железобетонной плиты с применением уточненного метода и метода верификации результатов данных расчетов, суммарная погрешность рассчитанных параметров НДС железобетонной плиты в условиях испытаний на огнестойкость для результатов расчета по характеристикам свойств, полученных по более грубым моделям Eurocode 2 составляет около 16 %, тогда как результаты, полученные по уточненным характеристикам дают погрешность в среднем не более 7 %. Данные результаты говорят о высокой эффективности разработанного метода верификации полученных результатов расчета.

**Выводы.** В результате проведенных исследований разработан метод верификации результатов расчета пределов огнестойкости по уточненному методу и показана его высокая эффективность вследст-

вие его чувствительности к точности применяемых математических моделей свойств компонентов железобетона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мосалков И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.
2. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. СТО 36554501-006-2006 – [Введен в действие 1996-01-01] – М., 2006. – 77 с. – (Национальный стандарт РФ).
3. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.
4. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона : [монография] / Клованич С.Ф., Мироненко И.Н. – Одесса: ОНМУ, 2007. – 110 с.
5. Поздеев С.В. Экспериментально-расчетный метод определения механических характеристик бетона в условиях нагрева/ Поздеев С.В. // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УГЗУ. – Вып. 28. – 2010. – С. 133–141.

С.В. Поздеев

### **Верифікація результатів уточненого розрахункового методу визначення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій**

У статті подані результати щодо розробки методів верифікації результатів розрахунку меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій за уточненими методами на базі моделювання їх напружено-деформованого стану в умовах пожежі.

**Ключові слова:** межа вогнестійкості, залізобетонні конструкції, уточнений розрахунковий метод, верифікація результатів

S.V. Pozdeyev

### **Verification of results of the specified calculation method of determination of limits of fire-resistance of reinforced concrete constructions**

In the article the results of development of methods of verification of results calculation of limits of fire-resistance reinforced concrete constructions are resulted by the specified methods on the base of design of their tense-deformed state in the conditions of fire.

**Keywords:** limit of fire-resistance, reinforced concrete constructions, specified calculation method, verifikation of results