

УДК 624.012

## МЕТОД ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ДЛЯ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ИХ ОГНЕСТОЙКОСТИ

Поздеев С.В., д.т.н., Словинский В.К., Щипец С.Д., Омельченко А.Н.  
Академия пожарной безопасности им. Героев Чернобыля ГСЧС Украины

e-mail: svp\_countrymen@mail.ru

*В статье рассмотрены вопросы реализации экспериментально-расчетного метода оценки огнестойкости железобетонных колонн на основе их огневых испытаний без приложения механической нагрузки. Данный метод использован для оценки предела огнестойкости железобетонной колонны, в результате чего показана его высокая точность и достоверность.*

*In the article the questions of realization of experimental-calculation method of estimation of fire-resistance of reinforced concrete columns on the basis of their fire tests without the appendix of the mechanical loading are considered. This method is used for estimation of limit of fire-resistance of reinforced concrete column, his high exactness and authenticity is shown as a result.*

(Поступила в редакцию 19 декабря 2013 г.)

### Введение

В настоящее время наиболее достоверными для определения фактических пределов огнестойкости (ФПО) считаются методы, основанные на проведении огневых испытаний.

Испытания железобетонных колонн на огнестойкость происходит в соответствии с действующими государственными стандартами [1–3]. Согласно этим стандартам колонна должна быть подвергнута огневому действию в условиях ее нагружения силовыми факторами, полностью соответствующему действующим нагрузкам согласно расчетной схеме конструкции здания. Такие факторы создаются соответствующими узлами испытательных установок, которые включают огневую печь и опорно-нагружающее устройство.

При реализации таких условий возникают определенные технические сложности, которые заключаются в несоответствии условий закрепления и нагрузки колонны, реализуемой в установках для испытаний закреплению и нагрузкам в соответствующей конструкции, несовпадении габаритных размеров колонны-образца для испытаний, размеров реальной колонны и т. д. Поэтому стандартом на испытание колонн на огнестойкость [2] не запрещаются испытания без приложения механических нагрузок, но в то же время указанный стандарт не дает обоснованной методики определения предела огнестойкости железобетонных колонн на основе таких испытаний.

Анализ публикаций [4–6], касающихся расчетных методов проектирования железобетонных колонн при анализе их соответствия требованиям противопожарных норм, показывает, что данные методы дают возможность комплексно учесть все особенности поведения железобетона в условиях пожара, что делает перспективным их сочетание с экспериментальными методами. В работе [4] показана эффективность такого сочетания. В связи с этим была поставлена цель исследования, которая заключается в разработке эффективного экспериментально-расчетного метода оценки фактических пределов огнестойкости железобетонных колонн квадратного сечения на основе их огневых испытаний без приложения механической нагрузки.

### Результаты

В работе [4] предложен подход, который основан на математической интерпретации результатов огневых испытаний железобетонных колонн без приложения механической нагрузки. Данными, подлежащими интерпретации, являются значения температур, измеренные во внутренних слоях колонн, подвергнутых огневому воздействию в соответствии со стандартным температурным режимом пожара. Реализация метода происходит по алгоритму, блок-схема которого показана на рис. 1.

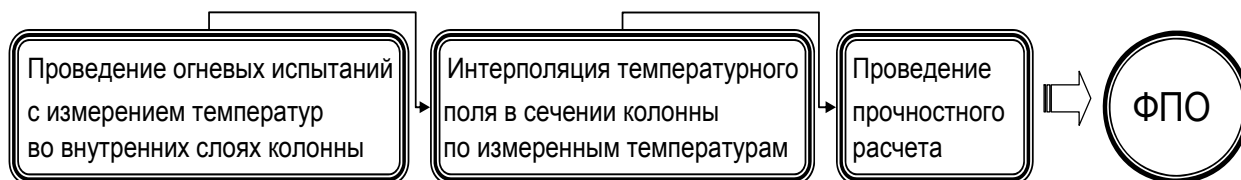


Рисунок 1 – Алгоритм реализации экспериментально-расчетного метода оценки огнестойкости железобетонных колонн

Измерения температуры при испытаниях происходят при расположении термодатчиков в сечении согласно схеме на рис. 2.

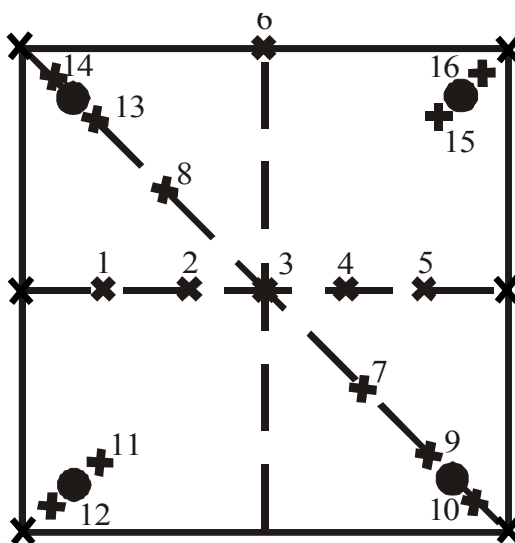


Рисунок 2 – Расположение термодатчиков в сечениях железобетонной колонны (1–16 – номера контрольных точек в сечении)

Из нашей работы [4] следует, что для определения температур в узловых точках сечения колонны разбитого на квадратные зоны эффективным является применение интерполяции температурного поля между температурными распределениями по центральному горизонталю, вертикали и диагонали, которые могут в общем виде описаны параболическими зависимостями вида:

$$T(i)|_{x \leq 0} = T_0 + (T_{\max} - T_0) \left[ \frac{i}{n} \right]^q, \quad (1)$$

где  $T_0$  – минимальная температура, °С;

$T_{max}$  – максимальная температура, °С;

$i$  – номер контрольной точки в плоскости сечения;

$n$  – количество контрольных точек;

$q$  – показатель степени параболы, определяемый в результате приближения параболических зависимостей к результатам эксперимента.

Интерполяция температур в узловых точках сечения может быть осуществлена тремя способами. Интерполяцию по первому способу предлагается проводить с помощью аппроксимации линий, образованных фронтальными сечениями поверхности температурного поля, параболическими зависимостями. По второму способу интерполяция осуществляется с использованием аппроксимации образующих поверхности температурного распределения параболическими зависимостями. Третий способ заключается в аппроксимации линий изотерм аффинными кривыми и их построении в каждой точке дискретизированного сечения по зависимостям, определяемых выражением:

$$y(x) = q \left( 1 - \left( \frac{x}{q} \right)^p \right)^{1/p}, \quad (2)$$

где  $p$  и  $q$  – коэффициенты, подлежащие определению в приближенном расчете поверхности распределения температур.

Задача приближения поверхности распределения температур решается путем минимизации среднеквадратической невязки:

$$\Phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [T_{iM} - T_{iE}]^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $n$  – количество пространственно-временных контрольных точек;

$T_{iE}$ ,  $T_{iM}$  – экспериментальное и расчетное значение температуры в  $i$ -той пространственно-временной контрольной точке.

На рис. 3 показаны результаты интерполяции, полученные по трем разработанным способам.

Получить экспериментально температурные распределения в сечении колонны технически очень сложно. Поэтому для оценки адекватности результатов интерполяции были в качестве исходных данных взяты расчетные данные для колонны 300×300 из тяжелого бетона на гранитном заполнителе под воздействием стандартного температурного режима, полученные при решении нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности с граничными условиями третьего рода по методике, взятой из работы [7].

Как видно из рис. 3 и таблицы 1, наиболее адекватные результаты получаются при проведении интерполяции по третьему способу.

Для оценки эффективности рассмотренных методов интерполяции были проведены огневые испытания двух железобетонных колонн 500×500×3000 из тяжелого бетона на гранитном заполнителе в огневой печи. Схема и общий вид испытательной установки приведена на рис. 4 и рис. 5.

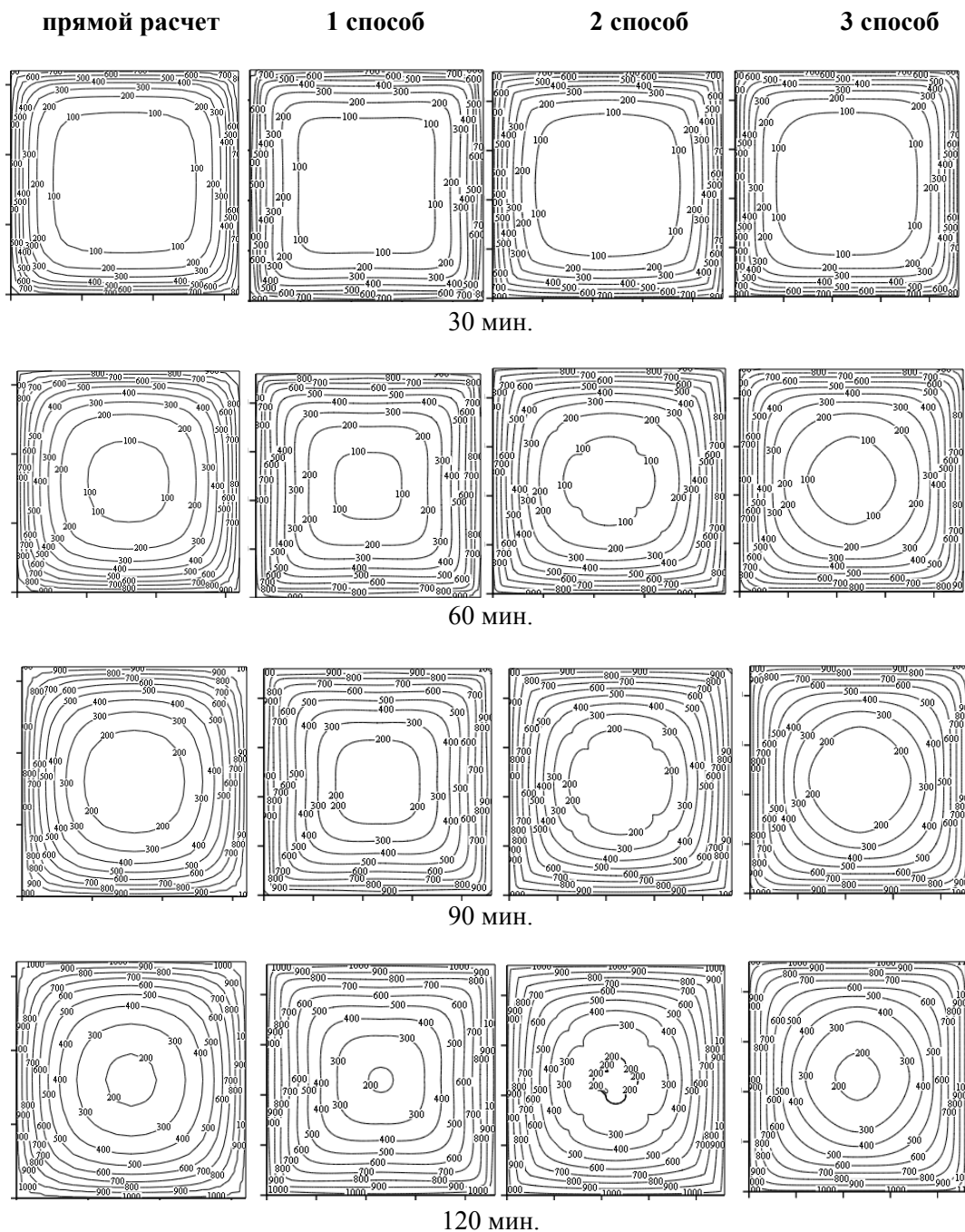


Рисунок 3 – Температурные распределения (°C) в сечении железобетонной колонны 300×300 из тяжелого бетона, полученные в результате интерполяции

Таблица 1 – Данные сравнительного анализа результатов интерполяции по разным методам

Способ интерполяции	Максимальное отклонение, °C	Среднее относительное отклонение, %	Среднеквадратичное отклонение, °C
первый	95	10,8	22,4
второй	67	5,2	11,4
третий	112	4,4	8,9

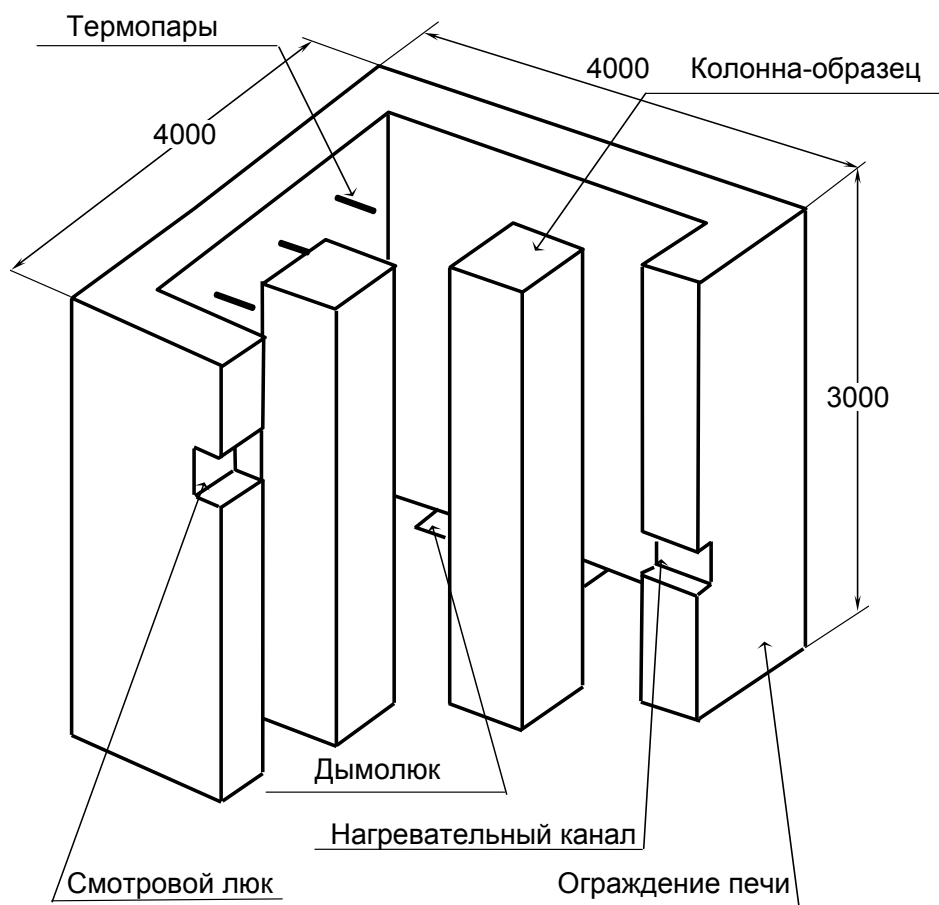


Рисунок 4 – Схема испытательной установки



Рисунок 5 – Общий вид испытательной установки

Схема армирования колонны и схема расположения термодатчиков показана на рис. 6.

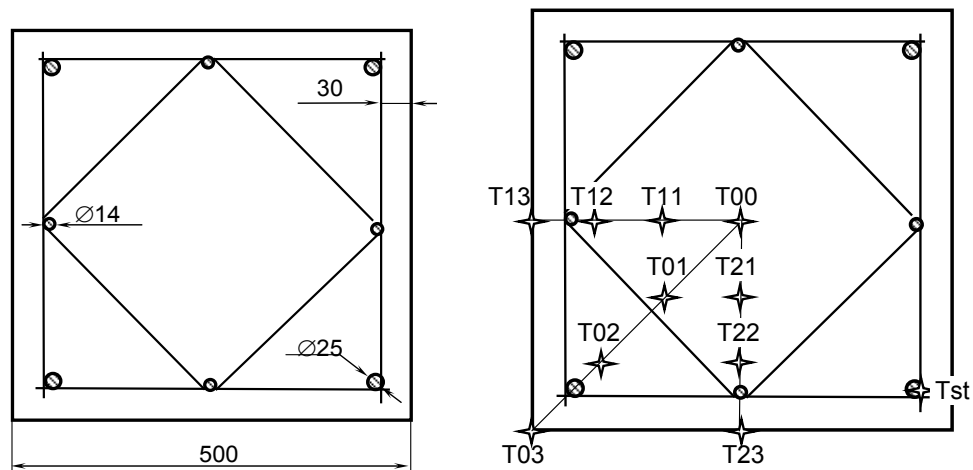


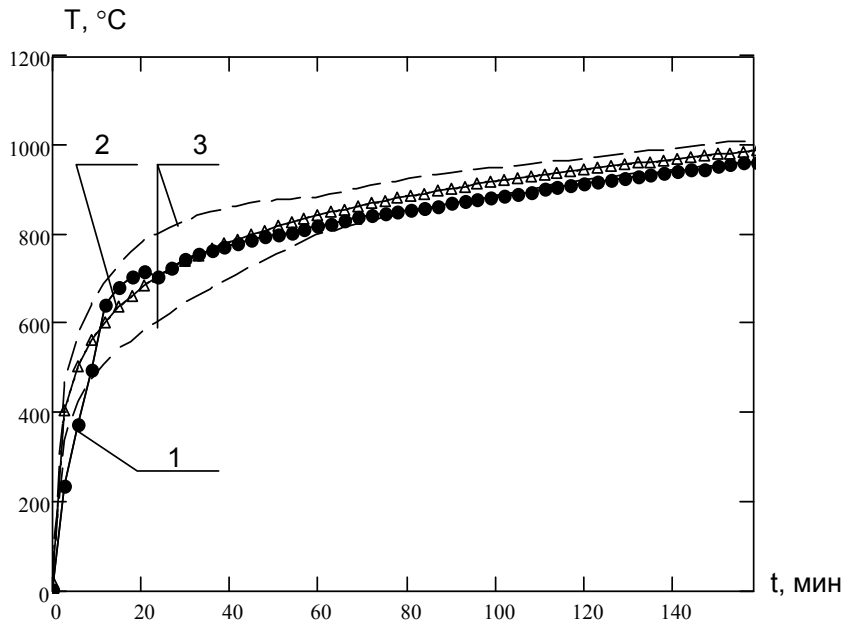
Рисунок 6 – Схема армирования (а) и схема расположения термодатчиков (б) железобетонной колонны

На рис. 7 показан общий вид образцов перед испытаниями.



Рисунок 7 – Общий вид образцов перед испытаниями

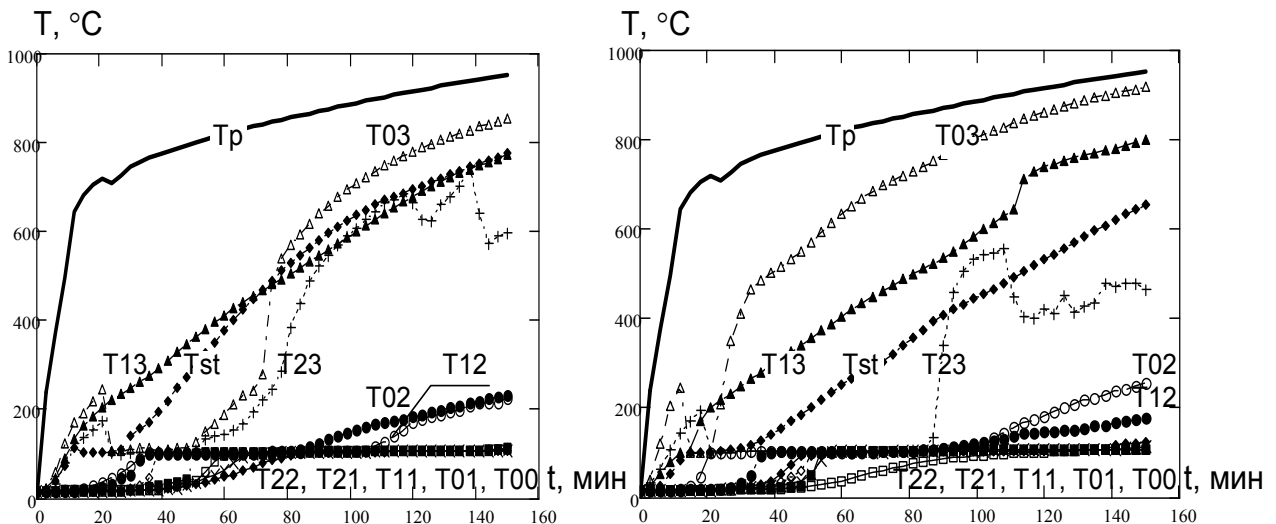
На рис. 8 показан температурный режим испытаний железобетонных колонн.



1 — средняя температура в печи, 2 — стандартная температурная кривая, 3 — допустимые отклонения температурного режима

**Рисунок 8 – Температурный режим испытаний в печи**

Температурные показатели во внутренних слоях сечения колонны показаны на рис. 9.



**Рисунок 9 – Результаты измерения температур в колонне**

Анализа графиков на рис. 9 показал, что некоторые из них имеют горизонтальные и даже спадающие участки. Данное явление обусловлено интенсивным парообразованием и физико-химическими процессами, которые связаны с термическим разложением цементного камня. Это означает, что получаемые реальные температурные поверхности будут существенно отличаться от параболоидов, построенных теоретически. Тем не менее,

парообразование относится к случайным воздействиям и в общем случае должен быть получен соответствующий параболоид. С использованием разработанных алгоритмов были получены параболические распределения температур в сечении в соответствии с теоретическими данными, получаемыми при решении задачи теплопроводности. На рис. 10 представлены результаты расчета по 1 и 3 способу. 2 способ дал результаты, которые не соотнобуются с теоретическими представлениями о теплопередаче, поэтому они далее не рассматриваются.

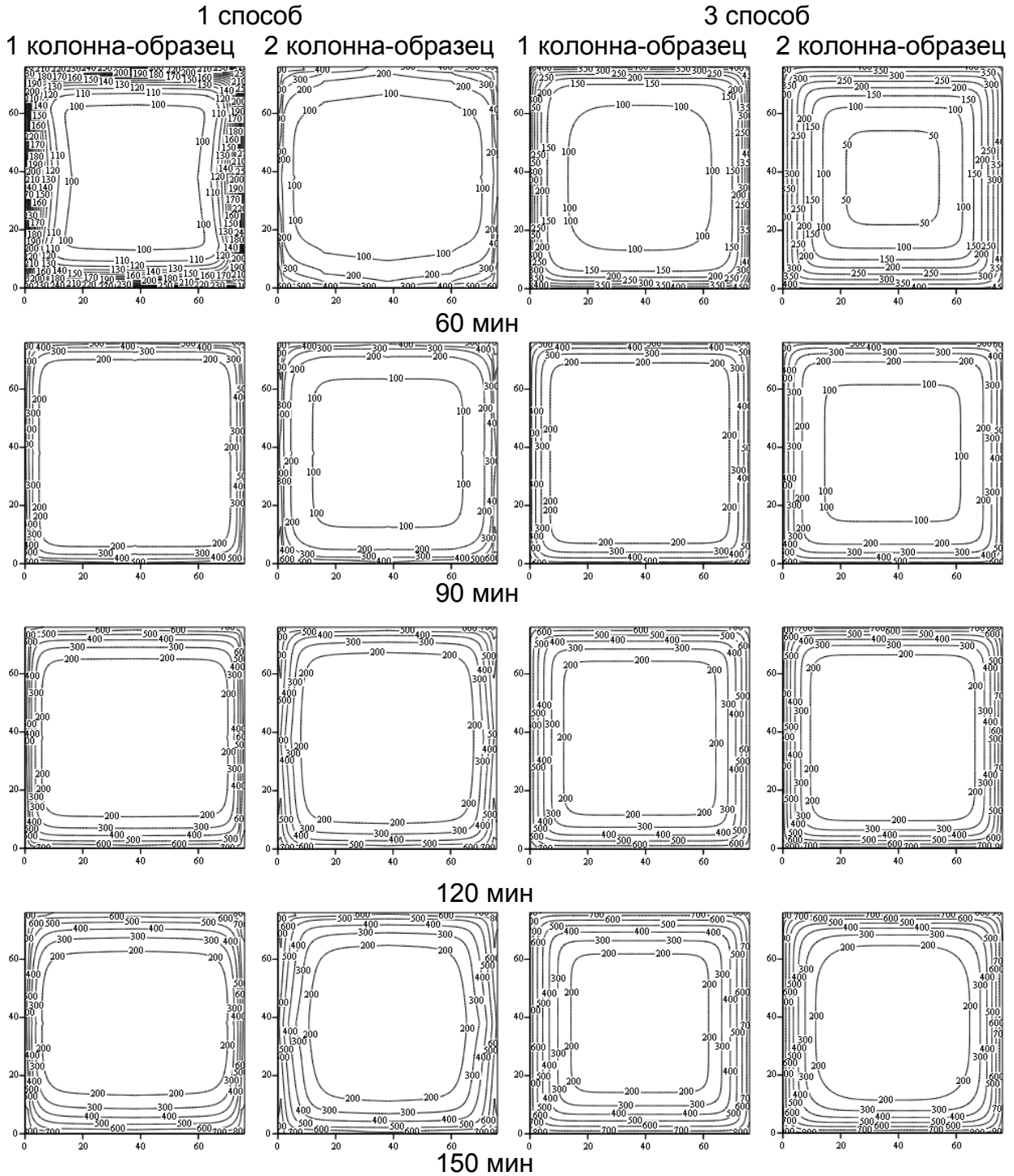


Рисунок 10 – Результаты измерения температур (°C) в колонне



При сравнении результатов, полученных данными методами, видно, что они подобны. Первый способ позволяет учесть неоднородность огневого воздействия, а второй менее восприимчив к случайным воздействиям в эксперименте типа чрезмерного парообразования из-за плохой сушки колонн-образцов. Для более подробного анализа далее были проанализированы отклонения расчетных данных от результатов экспериментов. В таблице 2 приведены результаты сравнительного анализа.

Таблица 2 – Данные сравнительного анализа результатов интерполяции по разным методам

Способ интерполяции	Максимальное отклонение, °С	Среднее относительное отклонение, %	Среднеквадратичное отклонение, °С
первый	75	7,8	26,3
третий	89	6,5	25,5

Полученные результаты интерполяции выглядят удовлетворительными и их можно использовать для расчета предела огнестойкости согласно одному из методов. Для анализа прочностной задачи предлагается использовать алгоритм, рекомендуемый евро-нормами по расчету огнестойкости железобетонных конструкций Eurocode 2 [5] пункта В3 дополнения В. Используя данный алгоритм расчета, был построен график критической силы в каждый момент времени испытания. На основании сравнения значения несущей способности, определяемого по графику с действующей силой, согласно расчетной схеме конструкции сделан вывод о наступлении предела огнестойкости исследуемой колонны. На рис. 11 приведены соответствующие графики.

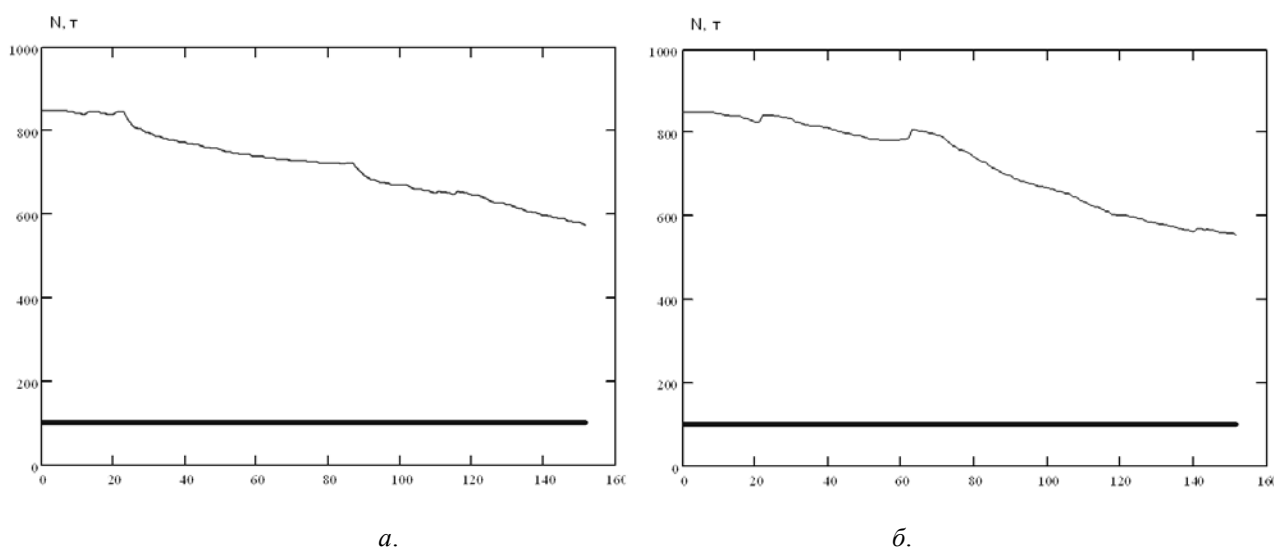


Рисунок 11 – Несущая способность колонны-образца № 1 (а) и колонны-образца № 2 (б)

Проведенные расчеты показали, что предел огнестойкости исследуемой железобетонной колонны в интервале контрольного времени не наступает.

### Выводы

1. В результате проведенных исследований был разработан экспериментально-расчетный метод оценки огнестойкости железобетонных колонн на основе их огневых испытаний без приложения механической нагрузки

2. Проведены огневые испытания железобетонных колонн и на их основе исследована устойчивость методов интерполяции в результате чего выделен наиболее эффективный метод интерполяции, который основан на аппроксимации изотерм поля.

3. На основе интерпретации полученных данных в ходе огневых испытаний был определен предел огнестойкости железобетонной колонны, показывающий эффективность разработанного метода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. ДБН В.1.1-7-2002 [Чинний від 2003-05-01.]. – К.: Видавництво “Лібра”, 2003. – 87 с. – (Національний стандарт України).
2. Захист від пожежі. Колони. Метод випробування на вогнестійкість. ДСТУ Б В.1.1-14-2007. [Чинний від 2007-06-15.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 12 с. – (Національний стандарт України).
3. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека. (ISO 834: 1975) ДСТУ Б В.1.1-4-98. [Чинний від 1998-10-28.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 20 с. – (Національний стандарт України).
4. Поздеев, С.В., Василенко І.Р., Кузьмін О.Г., Словінський В.К.// Тези доповідей конференції «Метод інтерпретації результатів вогневих випробувань залізобетонних колон для оцінки їх вогнестійкості». Матеріали XII Міжнародного виставкового форуму «Технології захисту» 15 Всеукраїнської науково-практичної конференції. 24-25 вересня 2013 р. – Київ: Інститут державного управління у сфері цивільного захисту, 2013 – С. 25-26.
5. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2004.
6. Милованов, А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.
7. Поздеев, С.В. Исследование эффективности математических моделей для решения теплотехнической задачи при определении огнестойкости железобетонных конструкций / Поздеев С.В., Поклонский В.Г., Некора О.В., Поздеев А.В. // Строительство, материаловедение, машиностроение : [сб. науч. трудов]. – Днепропетровск: ПГАСА, 2010. – Вып. 52: [серия «Безопасность жизнедеятельности»]. – С. 44-48.