

УДК 624. 012

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ИСПЫТАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ

Поздеев С.В., к.т.н.

*Академия пожарной безопасности имени Героев Чернобыля*

Тел. (0619) 42-04-42

**Аннотация** – в статье приведен анализ возможных рисков ошибочного воссоздания температурного режима при натуральных огневых испытаниях на огнестойкость железобетонных колонн посредством моделирования тепловых процессов в среде компьютерной системы CFD FlowVision.

**Ключевые слова** – тепловые процессы, математическое моделирование, температурный режим, огнестойкость железобетонных колонн, среда компьютерной системы CFD FlowVision.

**Постановка проблемы.** Для обеспечения безопасной эвакуации людей, работы оперативно-спасательных подразделений и сохранения материальных ценностей во время пожаров в зданиях и сооружениях большое значение имеет надежная работа железобетонных колонн при данном аварийном режиме, то есть их соответствие существующим нормативно-техническим нормам, которые регламентируют пределы их огнестойкости [2]. Для определения фактических пределов огнестойкости считается наиболее надежным и достоверным метод натуральных огневых испытаний [1, 2]. Метод натуральных огневых испытаний заключается в нагреве натурального образца, который полностью или частично соответствует реальному элементу железобетонной конструкции в специальной огневой печи при температурном режиме, который определен в нормативах [1] и называется стандартной температурной кривой пожара с приложением соответствующей механической нагрузки.

**Анализ последних исследований.** К огневым печам предъявляются особые требования, которые заключаются в том что, нагревающий факел должен создаваться на жидком топливе, пламя факела не должно касаться нагреваемых поверхностей элементов конструкций, по объему нагревательной камеры должно быть равномерное распределение

температуры и температура в течение испытания в объеме нагревательной камеры должна меняться по температурному режиму пожара, определенному в стандарте [1]. В силу того, что управление топливной системой не может обеспечить полное соответствие режима нагрева камеры печи стандартному температурному режиму пожара, существует определенная погрешность реализации режима нагрева элемента [3, 4].

К образцу для испытания предъявляются требования [1], которые заключаются в том, что его материал и геометрическая конфигурация должны в точности соответствовать материалу и геометрии данного элемента. Важной особенностью этих условий является то, что образцы с большими габаритными размерами, чем позволяют габариты огневой камеры печи и нагружающего устройства, вынужденно моделируются натурным образцам для испытаний с меньшими размерами.

Согласно работам [3, 4] данный метод имеет существенный недостаток, который состоит в погрешности при воспроизведении стандартного температурного режима в камере печи в связи с такими особенностями:

- взаимное расположение образцов и измерительных средств;
- теплообмен на поверхностях измерительных средств и образцов;
- движение и температурные показатели печных газов в пространстве камеры испытательной печи.

Для исследования возможных рисков ошибочного воспроизведения стандартного температурного режима пожара и повышения точности его воспроизведения необходимо провести моделирование тепловых процессов в огневой камере испытательной печи, которые происходят во время испытания железобетонных колонн на огнестойкость.

Кроме этого, существует ряд вопросов, связанных с начальными стадиями испытаний, поскольку в силу специфики эксперимента жесткий контроль параметров температурных режимов начинается с 10-й минуты испытаний.

*Цель статьи.* Провести исследования и проанализировать возможность рисков ошибочного воспроизведения температурного режима испытаний при натуральных огневых испытаниях, на огнестойкость железобетонных колонн при моделировании тепловых процессов в среде компьютерной системы CFD FlowVision.

*Результаты исследования.* В большинстве случаев определяют фактические пределы огнестойкости строительных конструкций на основе температурного режима «стандартного» пожара [1].

Для моделирования тепловых процессов при испытании железобетонной колонны на огнестойкость была выбрана огневая

печь, входящая в установку для натуральных испытаний центра испытаний ВНИИПО [5].

Чертеж фрагмента испытательной установки с огневой печью показан на рис. 1 а. На рис. 1 б представлена геометрическая конфигурация печи с расположенной в ней колонной сечением  $400 \times 400$ . Данная колонна выбрана как наиболее распространенная, применяемая в сборных каркасах. При этом хорошо исследовано ее поведение в условиях огневых испытаний [5]. Геометрия сечения колонны показана на рис. 2.

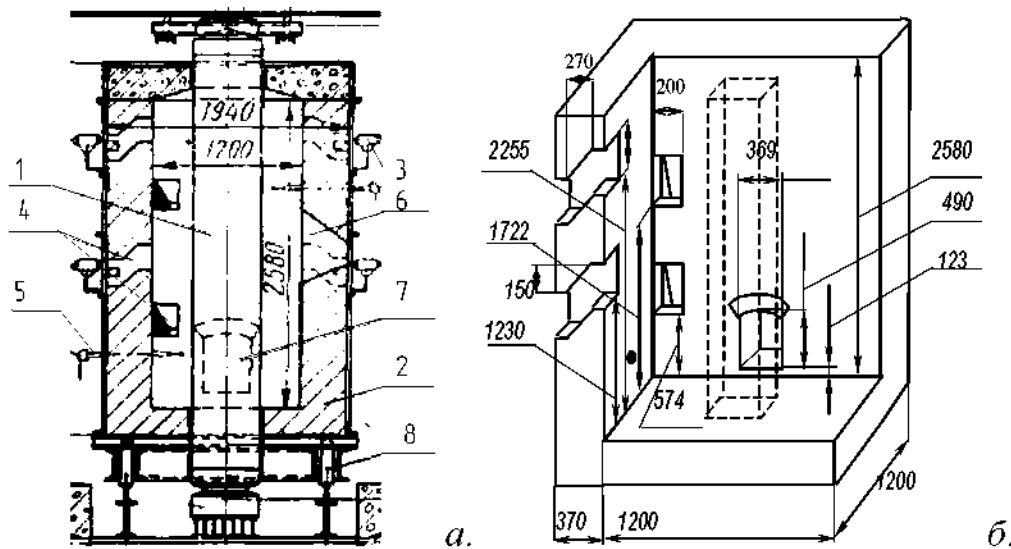


Рис. 1. Огневая печь для испытаний железобетонных колонн на огнестойкость: а – чертеж фрагмента установки с огневой печью; б – геометрия огневой печи с установленной в ней колонной

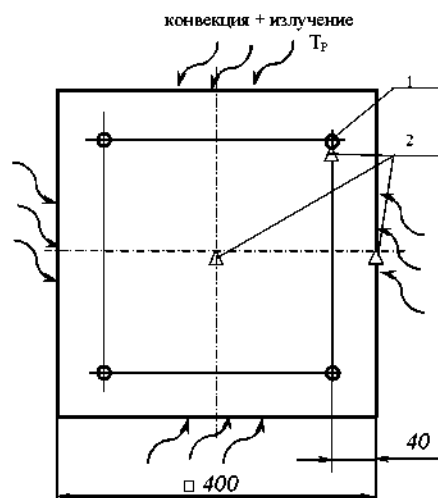


Рис. 2. Конструктивная схема сечения испытуемой железобетонной колонны:

1 – арматура; 2 – места расположения термопар

Процесс испытания происходит с использованием следующей последовательности операций [1–4].

1. Монтажные и подготовительные работы.
2. Подготовка и включение топливной системы.
3. Установка контрольной температуры для стандартной температурной кривой пожара на 10-й минуте испытаний.
4. Включение горелок и инициация процесса горения в автоматическом режиме с выходом на контрольную температуру путем автоматического включения и выключения горелок согласно контрольным данным термопары.
5. После десятой минуты поминутное достижение каждого значения температуры стандартной кривой пожара регулированием включения и выключения форсунок.
6. Прекращение испытания при достижении признаков разрушения колонны или в оговоренных случаях достижении в термопаре в арматурном слое колонны критической температуры 480 °С.

Учитывая вышесказанное, были сформулированы основные принципы построения компьютерной модели.

1. В качестве основного инструмента построения модели и проведения численного эксперимента используется программный комплекс FlowVision 2.5.
2. Для моделирования тепломассообмена в печи используется полная система дифференциальных уравнений Навье-Стокса с учетом турбулентности (стандартная модель турбулентности k-ε).
3. Для моделирования горения используется модель горения Магнуссена.
4. В процессе численного эксперимента учитывается конвективный и радиационный теплообмен поверхности колонны и пространства камеры печи.
5. В камере предусматривается модель термопары в виде стержня длиной 100 мм и диаметром 6 мм с учетом конвективного и радиационного теплообмена.

Сущность численного эксперимента заключается в иницировании процесса горения с контролем температуры в середине модели термопары таким образом, чтобы температурный режим ее нагрева по возможности точно совпадал с температурной стандартной кривой пожара. Для этого средствами контроля системы FlowVision в интерактивном режиме снимаются текущие данные с термопары и при достижении максимальной температуры для определенного шага по времени процесс горения прекращается. Затем процедура инициации и прекращения горения повторяется для следующего временного шага. При

этом фиксируются данные о температуре поверхности, арматурного слоя и середины колонны для данного временного шага.

Для построения математической модели процесса теплообмена и проведения численного эксперимента была построена геометрическая компьютерная модель печи и установленных в ней железобетонной колонны и термопары. Данная модель показана на рис. 3.

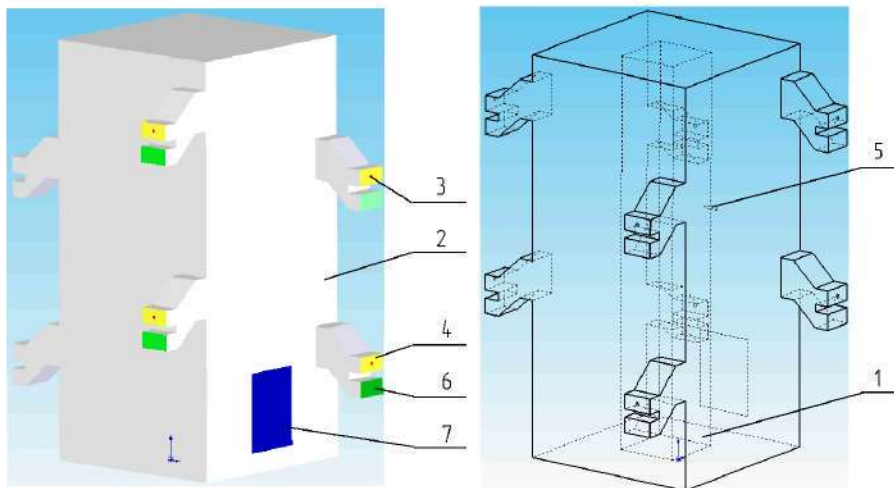


Рис. 3. Геометрическая компьютерная модель огневой печи с установленными в ней железобетонной колонной и термопарой: 1 – железобетонная колонна; 2 – ограждение печи; 3 – регион форсунки; 4 – регион вдува; 5 – термопара; 6 – регион тяги; 7 – регион дымолюка

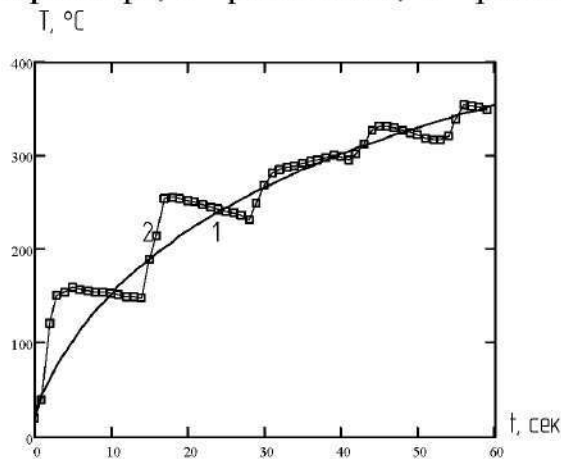


Рис. 4. Температурный режим термопары при реализации численного эксперимента: 1 – стандартный режим пожара; 2 – значения температуры в термопаре

Для проведения вычислительного эксперимента с использованием созданной математической модели огневой печи для испытаний использована нижеследующая последовательность расчетных процедур.

1. Иницируется процесс горения.

2. Значение температуры термопары визуализируется и контролируется сравнением для временного шага испытаний (подобранное оптимальное значение 10 с.).

3. После 0,05 с устанавливается более грубый шаг.

4. При достижении температуры термопары соответствующей температуре стандартного температурного режима пожара для данного временного шага процесс горения прекращается установкой соответствующих «граничных условий» (ГУ).

5. После выгорания всех частиц топлива (определяется по температуре факелов) устанавливается еще более грубый шаг до наступления следующего временного интервала.

6. Для следующего временного интервала расчетные процедуры повторяются.

7. При проведении расчета контролируется температура соответствующих точек колонны (см. рис. 2) и пространства печи.

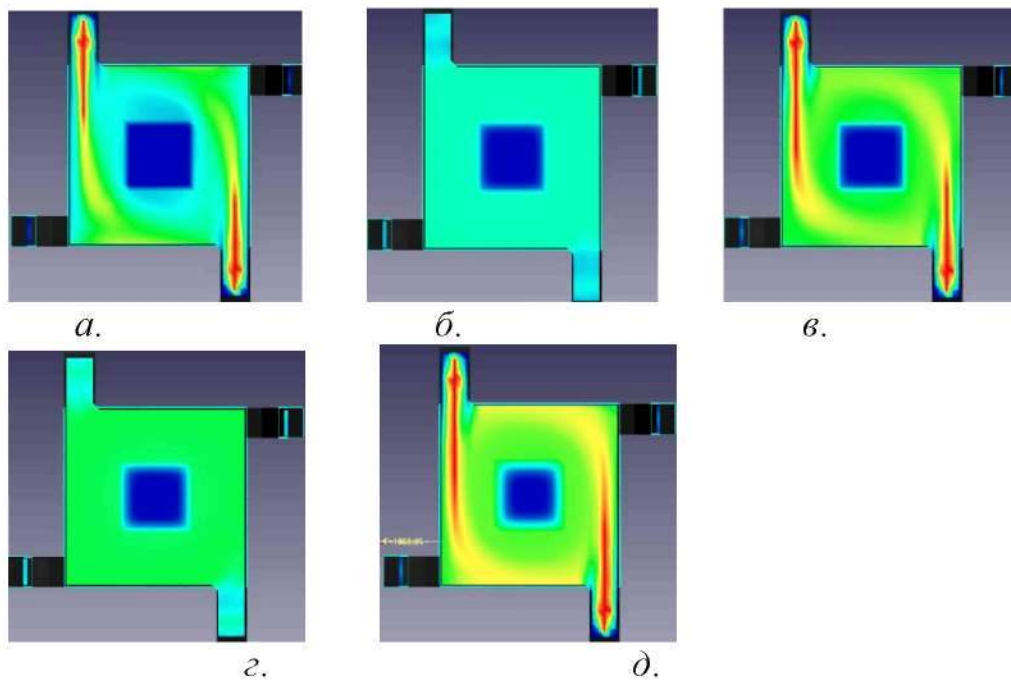


Рис. 5. Динамика прогрева внутренних слоев железобетонной колонны на разных этапах времени испытания:

*а* – при достижении первого контрольного значения температуры; *б* – в конце первого контрольного этапа времени нагрева, *в* – при достижении третьего контрольного значения температуры; *г* – в конце третьего контрольного этапа времени нагрева; *д* – при достижении последнего контрольного значения температуры

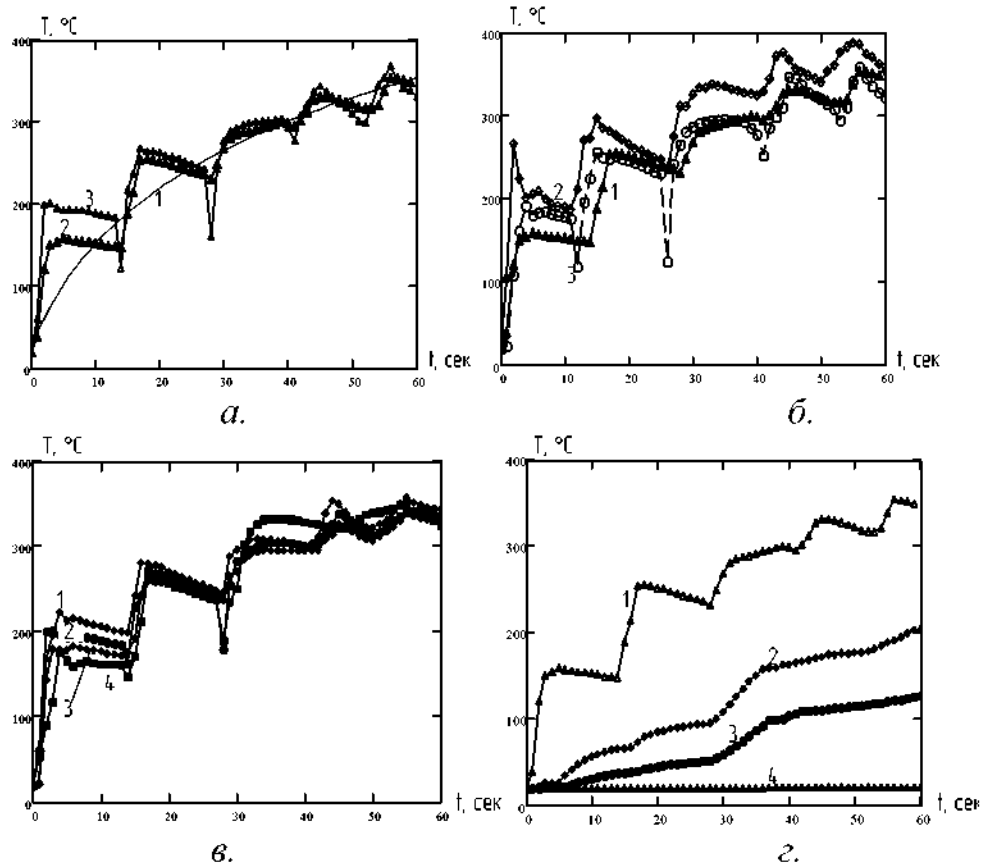


Рис. 6. Результаты расчетов температурных режимов нагрева камеры огневой печи и испытуемой колонны:

*а* - температурный режим нагрева термопары и нагрева камеры печи в области термопары: 1 – значения температуры в термопаре; 2 – максимальные значения температуры камеры печи на уровне термопары; 3 – минимальные значения температуры камеры печи на уровне термопары; *б* - температурный режим нагрева камеры печи на разных уровнях: 1 – значения температуры 1-го уровня; 2 – значения температуры 2-го уровня; 3 – значения температуры 3-го уровня; 4 – значения температуры 4-го уровня (уровни определяются согласно рис. 3 сверху вниз); *в* - температурный режим нагрева термопар на разных уровнях: 1 – значения температуры 1-го уровня; 2 – значения температуры 2-го уровня; 3 – значения температуры 3-го уровня; 4 – значения температуры 4-го уровня (уровни определяются согласно рис. 3 сверху вниз); *г* - температурные режимы прогрева внутренних слоев колонны: 1 – значения температуры термопары в камере; 2 – значения температуры на поверхности колонны; 3 – значения температуры в приарматурном слое; 4 – в середине колонны

При проведении численного эксперимента взят начальный участок стандартной температурной кривой в пределах одной минуты испытаний. Данный промежуток выбран, исходя из таких соображений:



1. Необходима отработка процедуры численного эксперимента для создания методики исследования процесса огневых испытаний.

2. Необходима корректировка данных вычислительного процесса с целью получения адекватных результатов численного эксперимента.

3. Необходимо рассмотрение начальных стадий инициации и развития горения в нагревательных каналах, поскольку такие процессы, как правило, не контролируются в ходе испытаний.

При применении параметров ГУ и вычислительного процесса, была получена временная температурная кривая достижения контрольных значений температуры в термопаре, показанная на рис. 4.

На рис. 5 показана динамика прогрева внутренних слоев железобетонной колонны во время испытаний. На рис. 6 показаны результаты расчета температурных режимов нагрева разных точек пространства печи и колонны.

#### *Выводы.*

1. Показана высокая эффективность системы FlowVision 2.5 для построения компьютерной модели огневой печи для испытания железобетонной колонны на огнестойкость.

2. Проведен численный эксперимент с использованием компьютерной модели огневой печи, построенной в системе FlowVision 2.5, испытаний на огнестойкость железобетонной колонны квадратного сечения 400×400 для 60 сек нагрева по стандартной температурной кривой пожара.

3. Исследованы погрешности показаний смоделированной термопары которые на первом этапе нагрева составили 53 °С а на последующих этапах 6 – 20 °С, что показывает достаточную точность показаний термопары в реальном эксперименте при учете больших скоростей протекания процесса нагрева на начальных этапах испытаний.

4. Исследованы начальные временные этапы стандартных огневых испытаний железобетонных колонн на огнестойкость, в результате чего сделан вывод о характера влияния на результаты испытаний периодичности работы форсуночной системы.

5. Разработана методика численного эксперимента испытаний на огнестойкость железобетонной колонны с использованием компьютерной модели огневой печи, построенной в системе FlowVision 2.5, испытаний на огнестойкость железобетонной колонны.

#### Литература

1. ДСТУ Б В.1.1-4-98. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека. – К. : Укрархбудінформ, 2005. – С. 3.
2. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. – 2000. – С. 4.



3. *Harmathy T.Z.* The fire resistance test and its relation to real world fires / *T.Z. Harmathy* // *Fire and Materials*. – Vol. 5. – No 3. – 1981. – P. 59–65.
4. *Згуря В.І.* Удосконалення системи визначення пожежонебезпечних властивостей речовин, матеріалів та будівельних конструкцій: автореф. дис. ... канд. тех. наук / *В.І. Згуря*. – Київ, 2007. – 21 с.
5. *Хасанов И.Р.* Развитие методов исследования огнестойкости и пожарной опасности строительных конструкций и инженерного оборудования / *И.Р. Хасанов, В.И. Голованов* // Юбилейный сборник трудов ФГУ ВНИИПО МЧС России / [Под общ.ред. Н.П. Копылова]. – М.: ВНИИПО, 2007. – С. 121–158.
6. Система моделирования движения жидкости и газа. FlowVision версия 2.5.4. Руководство пользователя. – Москва: ТЕСИС, 2008. – 284 с.
7. *Мишин Е.М.* Автоматическое регулирование температуры в печах для огневых испытаний конструкций / *Е.М. Мишин, Ю.А. Гринчик, П.С. Шумайлов* // Огнестойкость строительных конструкций. – М.: ВНИИПО, 1974. – С. 101–111.

### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПОЧАТКОВОЇ СТАДІЇ ВИПРОБУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КОЛОНИ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ**

Поздеев С.В.

**Анотація** – у статті наведено аналіз можливих ризиків помилкового відтворення температурного режиму при натурних вогневих випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних колон за допомогою моделювання теплових процесів в середовищі комп'ютерної системи CFD FlowVision.

### **MATHEMATICAL MODELLING OF THERMAL PROCESSES OF AN INITIAL STAGE OF THE TEST OF A REINFORCED CONCRETE COLUMN ON FIRE-RESISTANCE**

S. Pozdeyev

#### **Summary**

The analysis of possible risks of the erroneous reproduction of temperature condition at model fire tests on fire-resistance of reinforced concrete columns with using modelling of thermal processes in the environment of CFD FlowVision software is considered in the article.