

С.В. Поздеев, канд. техн. наук

Академия пожарной безопасности имени Героев Чернобыля, г. Черкассы

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОГНЕВОЙ ПЕЧИ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ

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

*In the article the analysis of possible risks of erroneous reproduction of temperature condition of tests is conducted at the model fire tests on the fire-resistance of reinforced concrete columns at the help design of thermal processes in the environment of the computer system CFD FlowVision.*

### Введение

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 натурных огневых испытаний [1, 2]. Метод натурных 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. Стандартный режим в большинстве случаев не соответствует реальным пожарам, но является их усреднением и принят для того, чтобы обеспечить воспроизводимость результатов испытаний. Испытания проводятся в течение времени, которое определено требуемым пределом огнестойкости, или до наступления одного из предельных состояний, в данном случае потери несущей способности.

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 гео-

метрическая 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 образцом 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 исследования** состоит в анализе возможных рисков ошибочного воспроизведения температурного режима испытаний при натурных огневых испытаниях на огнестойкость железобетонных колонн при моделировании тепловых процессов в среде компьютерной системы CFD FlowVision.

### Основные результаты исследования

В большинстве случаев определяют фактические пределы огнестойкости строительных конструкций на основе

температурного режиму «стандартного» пожеги [1]. Температурний режим «стандартного» пожеги виражається формулою

$$T_p = T_0 + 345 \cdot \lg(8t + 1), \quad (1)$$

де  $t$  — час пожеги, *мин.*

Для моделювання теплових процесів при испытанні залізобетонної колонни на вогнестійкість була вибрана вогнева печ, що входить в установку для натурних испытаній центра испытаній ВНИИПО [5].

Дана печ вибрана в силу того, що вона добре відома і давно введена в експлуатацію. Крім цього добре описана її геометрія і умови роботи. Чертеж фрагмента испытательної установки з вогневою печю показано на рис. 1а. На рис. 1б представлена геометрична конфігурація печі з розташованою в ній колонною з сеченням 400×400. Дана колонна вибрана як найбільш розповсюджена, застосовувана в збірних каркасах. При цьому добре досліджено її поведінку в умовах вогневих испытаній [5]. Геометрія сечення колонни показана на рис. 2.

Процес испытання проходить з використанням наступної послідовності операцій [1–4].

1. Монтажні і підготовчі роботи.
2. Підготовка і включення топливної системи.
3. Установка контрольної температури для стандартної температурної кривої пожеги на 10-й минуті испытаній.
4. Включення горелок і ініціація процесу горіння в автоматичному режимі з виходом на контрольну температуру шляхом автоматичного включення і вимкнення горелок згідно контрольним даним термометра.
5. Після десятій минуті поминутне досягнення кожного значення температури стандартної кривої пожеги регулюванням включення і вимкнення форсунок.
6. Припинення испытання при досягненні ознак руйнування колонни або в обговорених випадках досягненні в термопарі в арматурному шарі колонни критичної температури 480 °С.

Для візуалізації ознак руйнування в печі передбачено смотровий люк б (рис. 1а).

Учитывая вищесказанное, були сформульовані основні принципи побудови комп'ютерної моделі.

1. В якості основного інструмента побудови моделі і проведення чисельного експерименту використовується програмний комплекс FlowVision 2.5.
2. Для моделювання тепломасообміну в печі використовується повна система диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса з урахуванням турбулентності (стандартна модель турбулентності  $k-\epsilon$ ).
3. Для моделювання горіння використовується модель горіння Магнуссена.
4. В процесі чисельного експерименту враховується конвективний і радіаційний теплообмін поверхні колонни і простору камери печі.
5. В камері передбачається модель термопару в вигляді стержня довжиною 100 мм і діаметром 6 мм з урахуванням конвективного і радіаційного теплообміну.

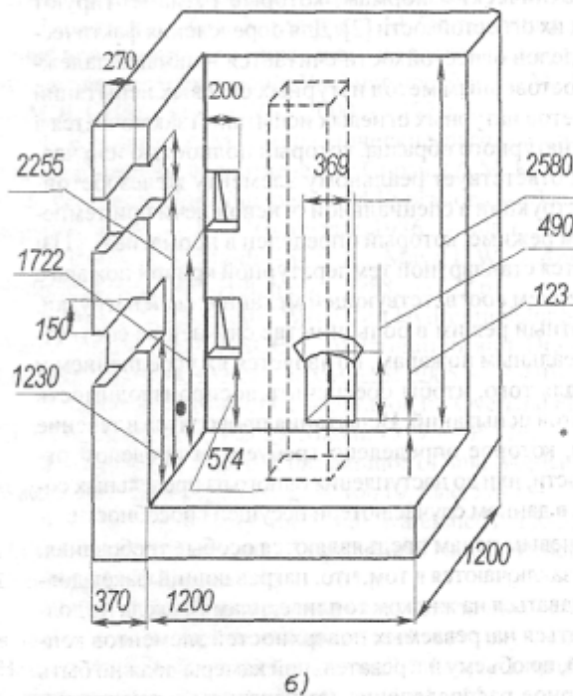
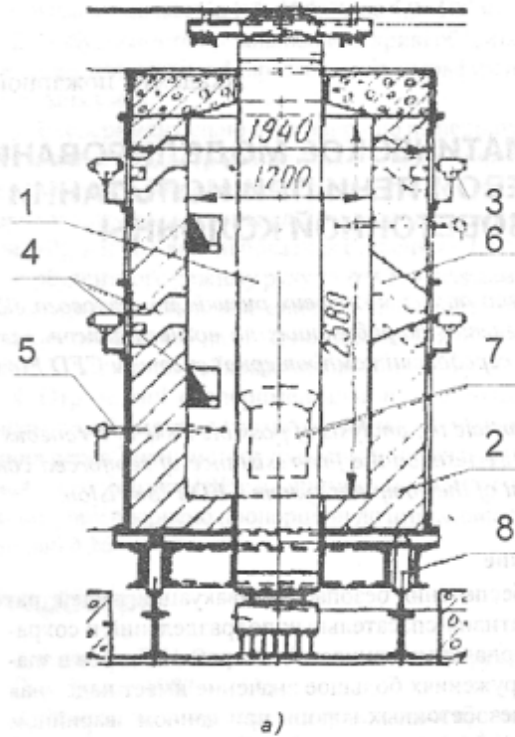


Рис. 1. Вогнева печ для испытаній залізобетонних колонн на вогнестійкість:  
а) чертеж фрагмента установки з вогневою печю;  
б) геометрія вогневої печі з установленною в ній колонною.

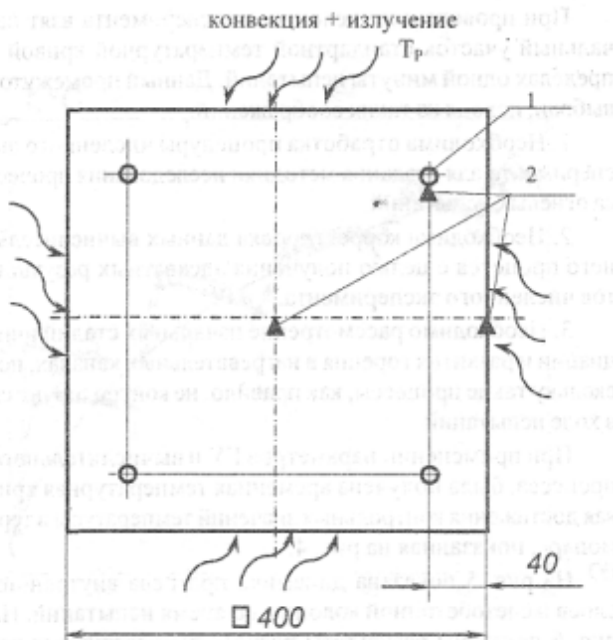


Рис. 2. Конструктивная схема сечения испытуемой железобетонной колонны: 1 — арматура; 2 — места расположения термодпар

Сущность численного эксперимента заключается в инициировании процесса горения с контролем температуры в середине модели термодпары 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 термодпары 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 термодпары. Данная модель показана на рис. 3.

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 термодпары, 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 термодпары соответствующей температуре стандартного температурного режима пожара для данного временного шага процесс горения прекращается установкой соответствующих ГУ.

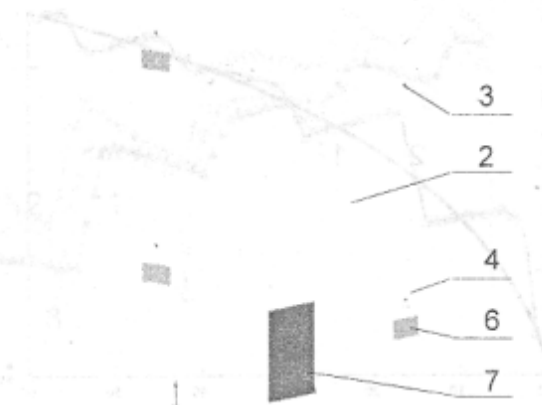
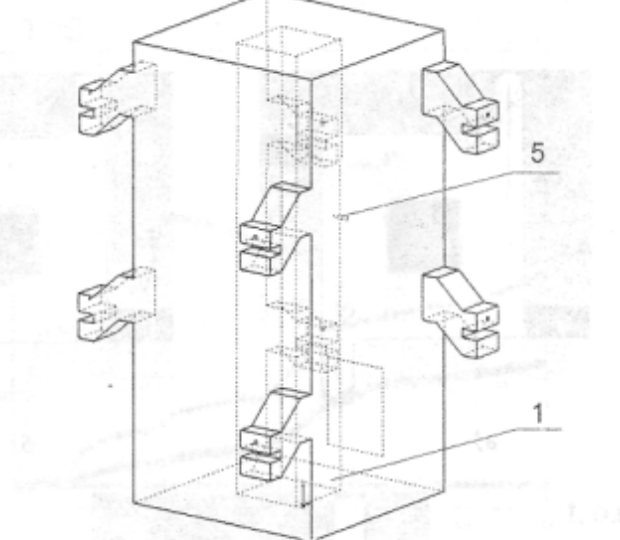


Рис. 3. Геометрическая компьютерная модель огневой печи с установленными в ней железобетонной колонной и термодпарой:



1 — железобетонная колонна; 2 — ограждение печи; 3 — регион форсунки; 4 — регион вдува; 5 — термодпара; 6 — регион тяги; 7 — регион дымоллюка.

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.

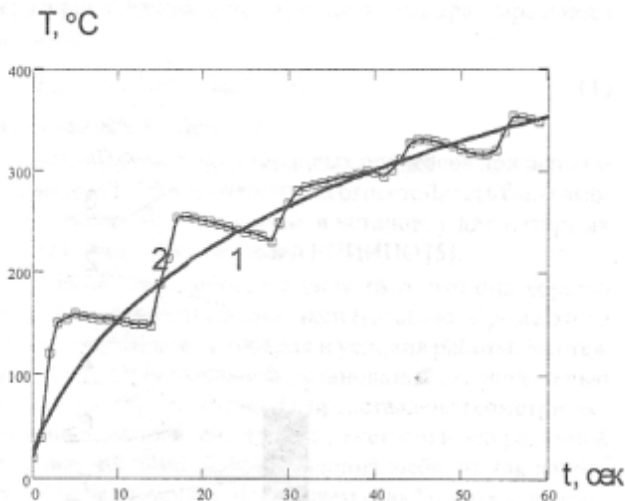


Рис. 4. Температурний режим термопары при реализации численного эксперимента:  
 1 — стандартный режим пожара;  
 2 — значения температуры в термопаре.

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.

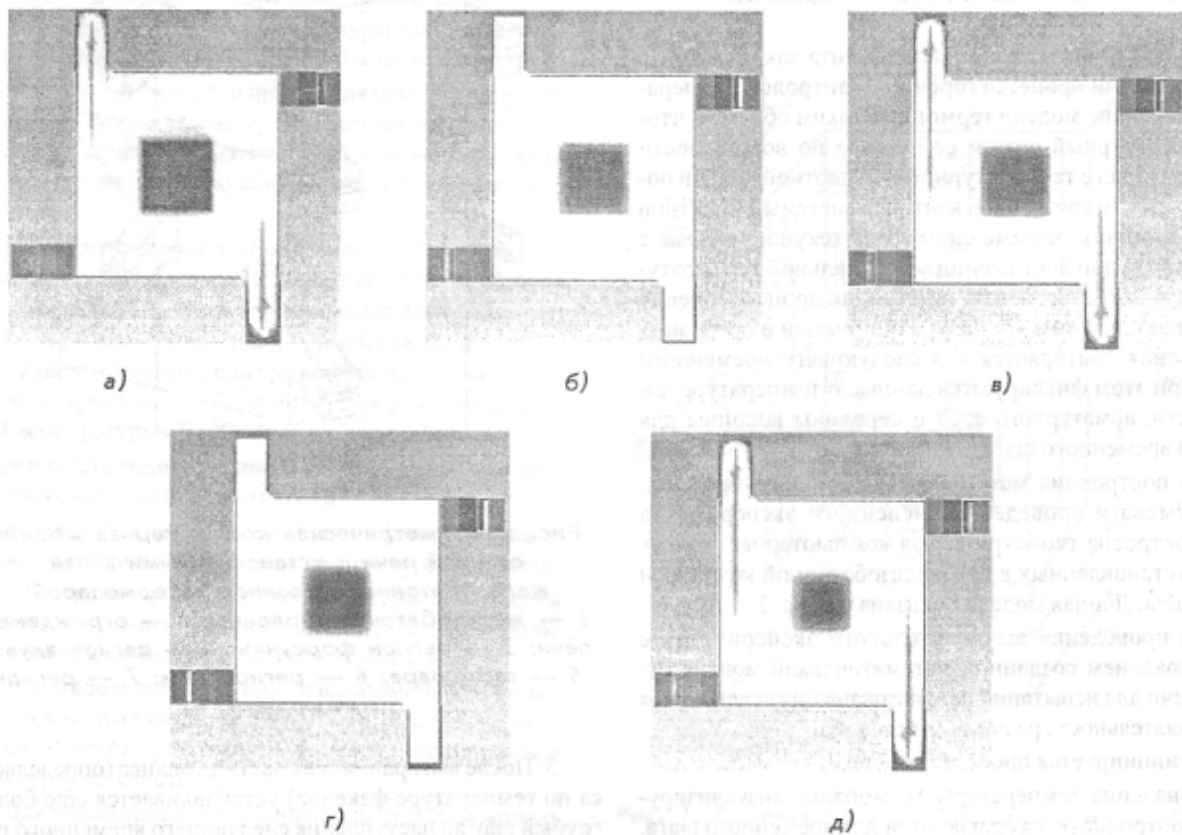


Рис. 5. Динамика прогрева внутренних слоев железобетонной колонны на разных этапах времени испытания:

- 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.



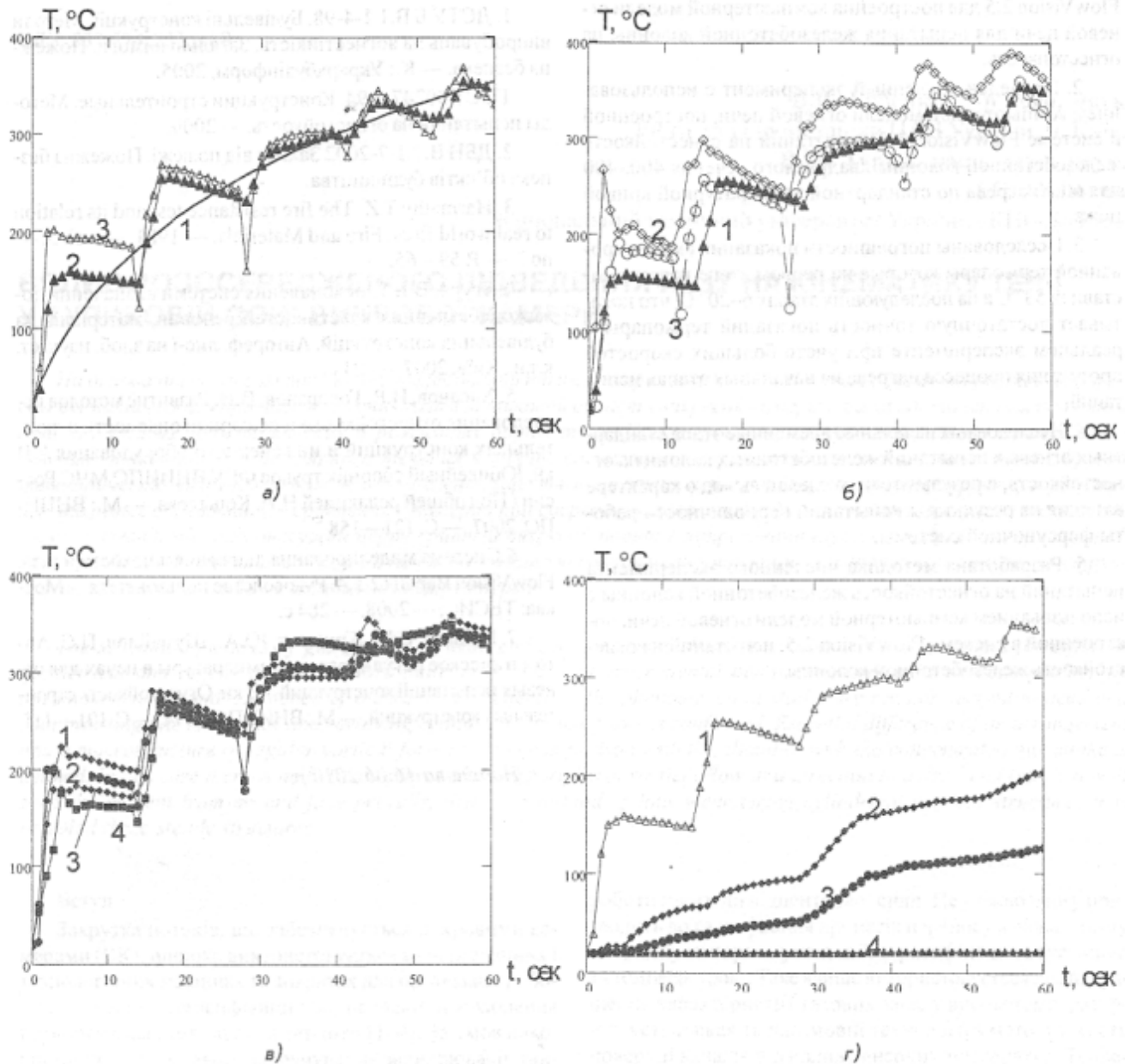


Рис. 6. Результаты расчетов температурных режимов нагрева камеры огневой печи и испытуемой колонны:

- 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 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).  
 г) температурные режимы прогрева внутренних слоев колонны: 1 — значения температуры термопары в камере; 2 — значения температуры на поверхности колонны; 3 — значения температуры в арматурном слое; 4 — в середине 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 с 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 этапа стандартных огневых испытаний железобетонных колонн на огнестойкость, в результате чего сделан вывод о характере 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.
- ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. — 2000.
2. ДБН В.1.1-7-2002 Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
3. Harmathy T.Z. The fire resistance test and its relation to real world fires. Fire and Materials. — 1981. — vol. 5. — no 3. — P. 59—65.
4. Згуря, В.І. Удосконалення системи визначення пожежонебезпечних властивостей речовин, матеріалів та будівельних конструкцій. Автореф. дис-ї на здоб. наук. ст. к.т.н., Київ, 2007. — 21 с.
5. Хасанов, И.Р., Голованов, В.И. Развитие методов исследования огнестойкости и пожарной опасности строительных конструкций и инженерного оборудования // В кн. Юбилейный сборник трудов ФГУ ВНИИПО МЧС России / Под общей редакцией 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., Гринчик, Ю.А., Шумайлов, П.С. Автоматическое регулирование температуры в печах для огневых испытаний конструкций // В кн. Огнестойкость строительных конструкций. — М.: ВНИИПО, 1974. — С. 101—111.

Надійшла 16.06.2010 р.

