

УДК 614.841.332

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ОГНЕВЫХ ПЕЧЕЙ НА АДЕКВАТНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ НЕСУЩИХ СТЕН НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ

Нуязин А.М., Сидней С.А., Федченко И.В.

Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля

e-mail: nuyanzin@i.ua

В статье описаны основные принципы построения математической модели огневой печи для испытаний несущих стен на основе полной системы уравнений Навье-Стокса с помощью программного комплекса CFD FlowVision 2.5. Проведены вычислительные эксперименты с использованием созданных моделей. Показаны особенности, которые могут влиять на адекватность результатов огневых испытаний несущих стен.

We show the basic principles of mathematical model of fire testing furnace load-bearing walls in full system Navier-Stokes equations using program complex CFD FlowVision 2.5. A computational experiment in the created model. Highlight features that may affect the adequacy of the results of fire tests bearing walls.

(Поступила в редакцию 7 мая 2015 г.)

Введение. В условиях пожара нарушение общей устойчивости здания всегда происходит вследствие разрушения отдельных элементов в каркасе здания. Учитывая это, одним из важных аспектов обеспечения пожарной безопасности является использование строительных конструкций с гарантированным пределом огнестойкости. Для определения фактических пределов огнестойкости наиболее эффективным считается метод огневых испытаний [1, 2]. Поэтому вопросы совершенствования и улучшения характеристик установок для огневых испытаний являются актуальными.

К огневым печам предъявляются особые требования. Нагревательный факел должен создаваться на жидком топливе; пламя факела не должно касаться поверхности нагреваемых элементов конструкций; по объему нагревательной камеры необходимо обеспечить равномерное распределение температуры, и температура в течение испытания в объеме нагревательной камеры должна соответствовать температурному режиму пожара, который определен в стандарте [1]. Управление топливной системой не может обеспечить полное соответствие режима нагрева камеры печи стандартному температурному режиму пожара, что ведет к появлению определенной погрешности при реализации данного режима [3].

Стандартные методы огневых испытаний достаточно хорошо изучены и им посвящено много исследований, но при этом недостаточное внимание было уделено изучению метрологических характеристик испытательных установок и влияния конструктивных особенностей этих установок на адекватность полученных результатов.

Существует много конструкций печей, которые различаются геометрическими конфигурациями, видом топливно-форсуночной системы, схемами расположения и конструкциями измерительной арматуры. Это может привести к тому, что различные испытательные установки могут давать результаты, отличающиеся на 30% и более. Если речь идет о времени, определяет наступления предельного состояния, а это фактически время, которое требуется для эвакуации людей и материальных ценностей, то для REI 60 отклонение может составлять около 20 минут, REI 120 – 40 минут, REI 150 – 50 минут. Это значительный промежуток времени, в котором определяется предел огнестойкости той или иной лабораторией, и при этом нет гарантий, что это может быть завышенный результат. В таком случае нельзя гарантировать безопасность людей и материальных ценностей в соответствии с существующими нормативами [3, 4].

Постановка задачи. Создать математические модели реальных огневых испытательных вертикальных печей на основе полной системы уравнений Навье-Стокса. Согласно результатам проведенных вычислительных экспериментов, сделать выводы относительно

показателей температуры в камере печи, термопаре и исследуемом образце. Выделить особенности, которые могут влиять на адекватность результатов огневых испытаний несущих стен.

Основная часть. Были рассмотрены 2 конфигурации огневых печей для испытаний на огнестойкость несущих стен Лаборатории 1 и Лаборатории 2. Данные печи реально существуют и были выбраны, как имеющие действительные аттестаты на проведение испытаний. На данный момент они являются единственной альтернативой для проверки огнестойкости несущих стен в Украине.

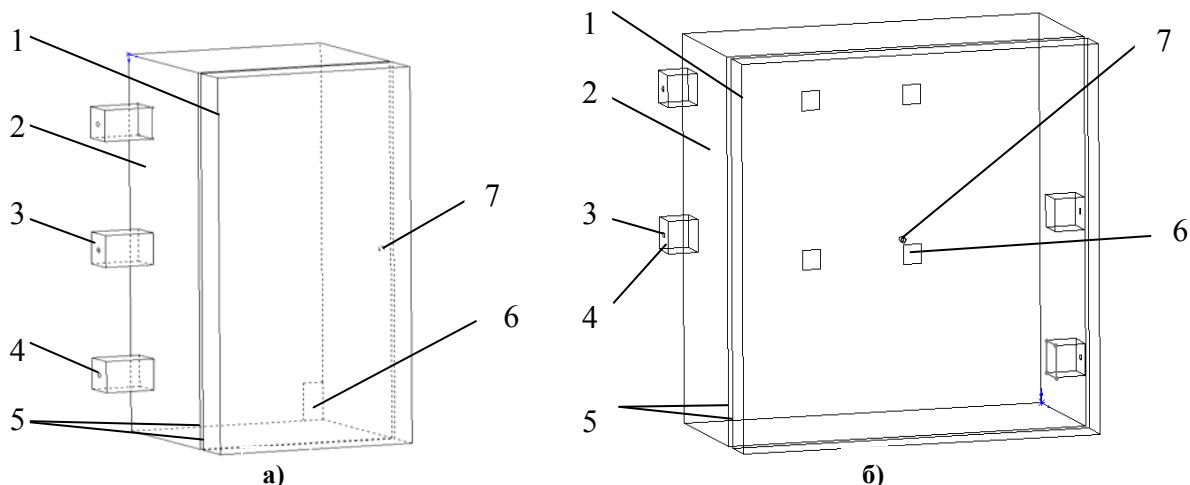


Рисунок 1 – Геометрическая конфигурация вертикальных печей («а» – Лаборатории 1 (изображена только симметрическая половина) и «б» – Лаборатории 2): 1 – ограждения печи; 2 – несущая стена; 3 – регион вдува; 4 – регион форсунок; 5 – сопряженные поверхности; 6 – регион выхода продуктов горения; 7 – модель термопары

Таблица 1 – Габаритные размеры установок для испытаний на огнестойкость несущих стен

Название печи	Размеры огневой камеры, мм			Количество горелок в печи	Источник
	длина	высота (ширина)	глубина		
Испытательная печь Лаборатории 1	3000	3000	1,2	6	[5]
Испытательная печь Лаборатории 2	3000	3000	1,5	4	

К основным принципам построения математической модели относятся:

- 1) как основной инструмент построения модели и проведения вычислительного эксперимента использован программный комплекс «FlowVision 2.5»;
- 2) в процессе вычислительного эксперимента учтен конвективный и радиационный теплообмен поверхности испытываемых конструкций и пространства камеры печи;
- 3) в камерах предусмотрена модель термопары в виде стержня длиной 100 мм и диаметром 6 мм с учетом конвективного и радиационного теплообмена;
- 4) рассмотрена симметричная половина огневой печи Лаборатории 1, что увеличивает производительность расчета.

Созданные геометрические модели импортированы в среду программного комплекса «FlowVision».

После ввода параметров математической модели, подобласть камеры печи сопрягается с конструкцией и термопарой. Кроме того, вводят общие параметры, такие как: ось гравитации, критерий Куранта-Фридрихса-Леви [6] и др.

Следующий этап заключался в создании сеточной модели печи. Метод контрольных объемов, примененный в программном комплексе, имеет определенные особенности (рис. 3 и рис. 4). Численное интегрирование уравнений по пространственным координатам проводят с использованием прямоугольной, адаптивной, локально измельченной сетки. Данный подход позволяет, с одной стороны, использование простой равномерной неадаптив-

ной сетки при выполнении задач по сравнительно несложной геометрии. С другой стороны, появляется возможность в процессе решения задач со сложной геометрией проводить адаптацию подстройки сетки к особенностям геометрии вблизи граничных условий, а в ходе решения задач с разрывными течениями – адаптацию по значениям анализируемых функций, их градиентов и др.

Процедура локального измельчения сетки в области адаптации предполагает последовательное дробление расчетных ячеек: исходной плоской ячейки на 4 более мелкие ячейки (в трехмерном случае на 8). Адаптация выполняется для улучшения сходимости вычислительного процесса и получения более точных результатов расчета.

Между точностью расчета и количеством расчетных ячеек существует приблизительно прямая пропорциональная зависимость, а между количеством ячеек и временем, за которое будет проведен расчет, – экспоненциальная. Поэтому нужно выбрать баланс между необходимой точностью расчета и временем, которое будет потрачено на проведение расчета.

Для учета конвективного и радиационного теплообмена поверхности термопары и пространства камеры печи, адаптивная сетка для термопары значительно измельчена (рис. 2-г и рис. 3-г). Для этого создана адаптация в месте расположения термопары.

Для учета особенности, которая заключается в наличии модели термопары, создана двухступенчатая адаптация сначала 1 уровня по пространству цилиндра охватывает термопару радиусом 0.01 м и высотой 0.12 м и 1 уровня по пространству подобласти термопары.

Температура, которую регистрирует термопара печи, зависит от нескольких факторов: конвективный и лучистый теплообмен поверхности термопары, пространство камеры печи. На практике термопару подстраивают к температуре, которая создает баланс между теплом, индуцированным конвективно и теплом, поступающего в результате излучения.

Суть проведения вычислительного эксперимента заключается в инициации процесса горения с контролем температуры внутри модели термопары так, чтобы температурный режим ее нагрева по возможности точно совпадал с температурной стандартной кривой пожара [1]. Для этого средствами контроля системы FlowVision в интерактивном режиме снимаются текущие данные с термопары, и, при достижении максимальной температуры для данного шага по времени параметры процесса горения меняются. Затем процедура изменения параметров процесса горения повторяется для следующего временного интервала. При этом фиксируются данные о температуре поверхности, арматурного слоя и середины железобетонного изделия для данного интервала.

Во время проведения численного эксперимента контроль температуры происходил так, чтобы температурный режим нагрева термопары по возможности точно совпадал с температурной стандартной кривой пожара и не выходил за допустимые пределы испытания [1]. Для этого средствами контроля системы FlowVision 2.5 в интерактивном режиме снимались текущие данные температуры на поверхности термопары, и, при достижении максимальной температуры для данного шага по времени, параметры процесса горения менялись. Для проведения вычислительного эксперимента с использованием созданных математических моделей огневых печей соблюдены последовательности расчетных процедур, описанные ниже:

- 1) инициация процесса горения с минимальным глобальным шагом по времени;
- 2) визуализация значения температуры с поверхности термопары и сравнение его со значением температуры согласно стандартному температурному режиму пожара для временного шага испытаний (рекомендуемое значение 10 с);
- 3) установка более грубого шага после 0,05 с;
- 4) при достижении температуры, соответствующей температуре стандартного температурного режима пожара для текущего временного интервала осуществляется прекращение процесса горения установкой соответствующих граничных условий;
- 5) установление еще более грубого шага после выгорания всех частиц топлива (определяют по температуре факелов) к следующему временному интервалу;
- 6) повторение расчетных процедур для следующего временного интервала;

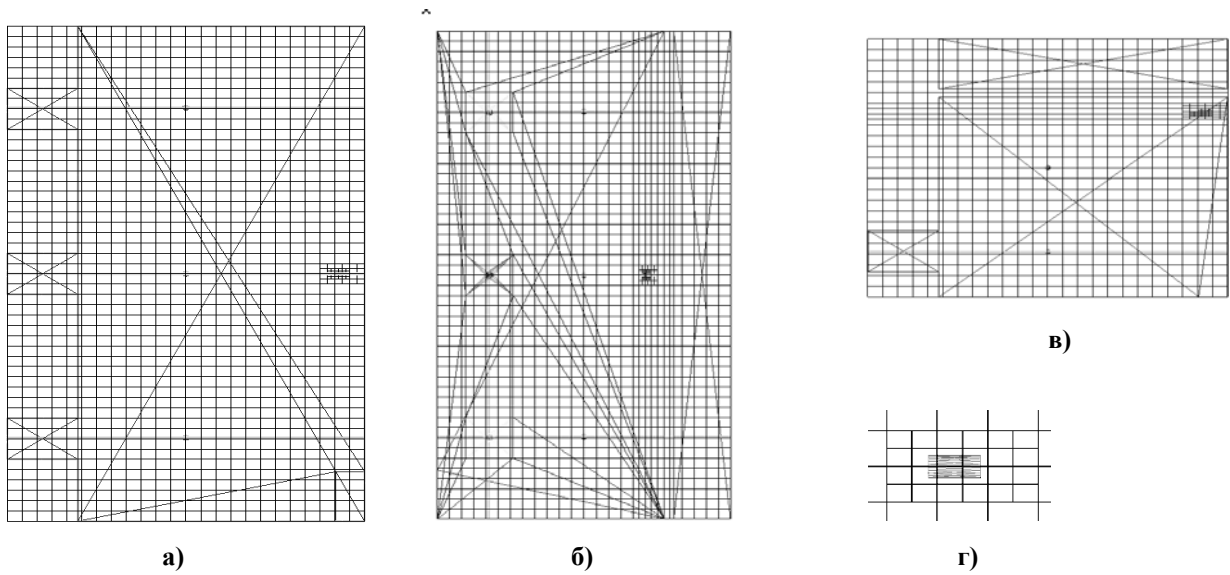


Рисунок 2 – Сеточная модель пространства вертикальной печи Лаборатории 1 (показана только симметричная половина): а – вид по оси Y; б – вид по оси X; в – вид по оси Z; г – адаптивная сетка для термопары (вид боковой поверхности термопары)

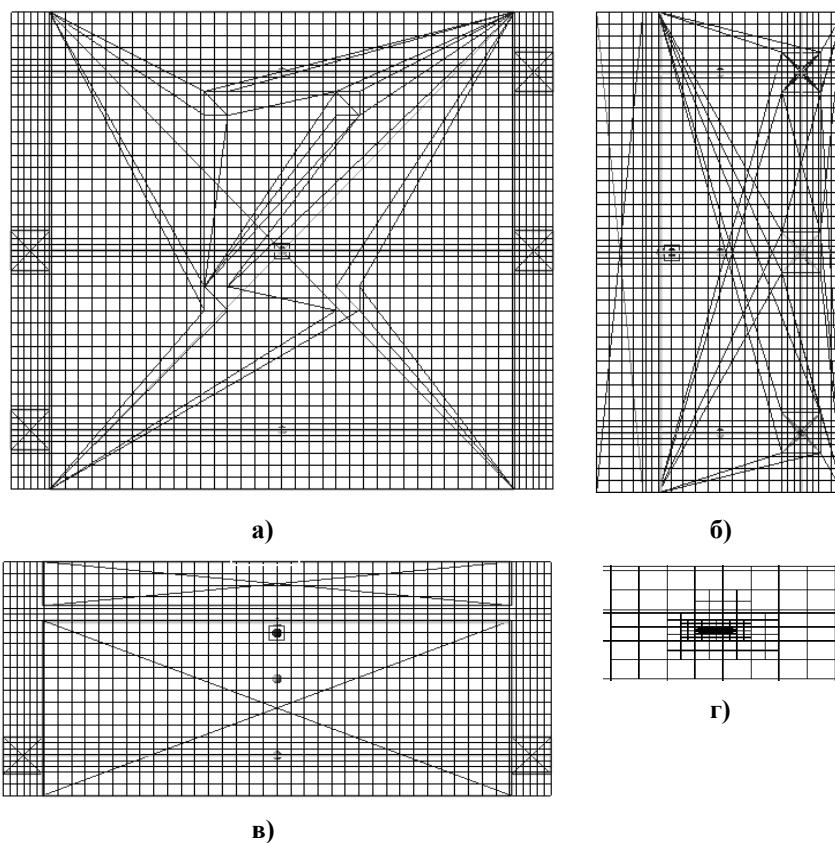


Рисунок 3 – Сеточная модель пространства вертикальной печи Лаборатории 2: а – вид по оси Y; б – вид по оси X; в – вид по оси Z; г – адаптивная сетка для термопары (вид боковой поверхности термопары)

7) контроль температуры в конструкции и пространства печи в соответствующих контрольных точках (рис. 4 и рис. 5).

Результаты вычислительного эксперимента. Температурные данные в контрольных точках, указанных на рис. 4 и рис. 5, фиксировались каждую секунду для достижения требуемой точности при построении графиков.

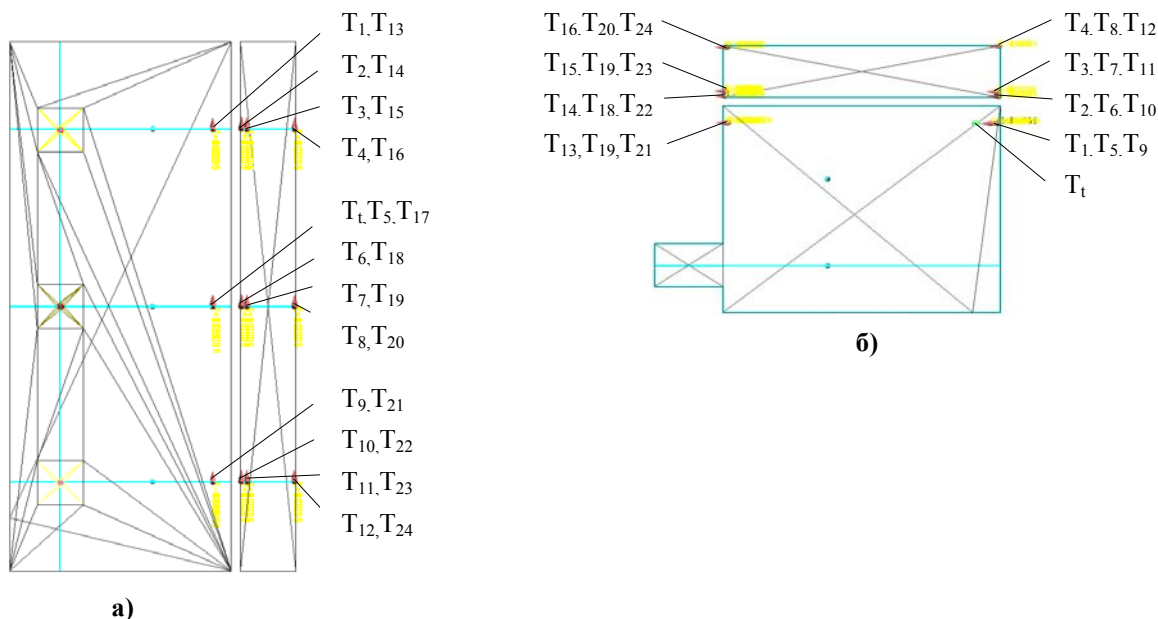


Рисунок 4 – Точки контроля температуры модели печи Лаборатории 1 (показана только симметричная половина): T_t, T_1-T_{24} – точки контроля температуры; а - вид по оси X; б - вид по оси Z

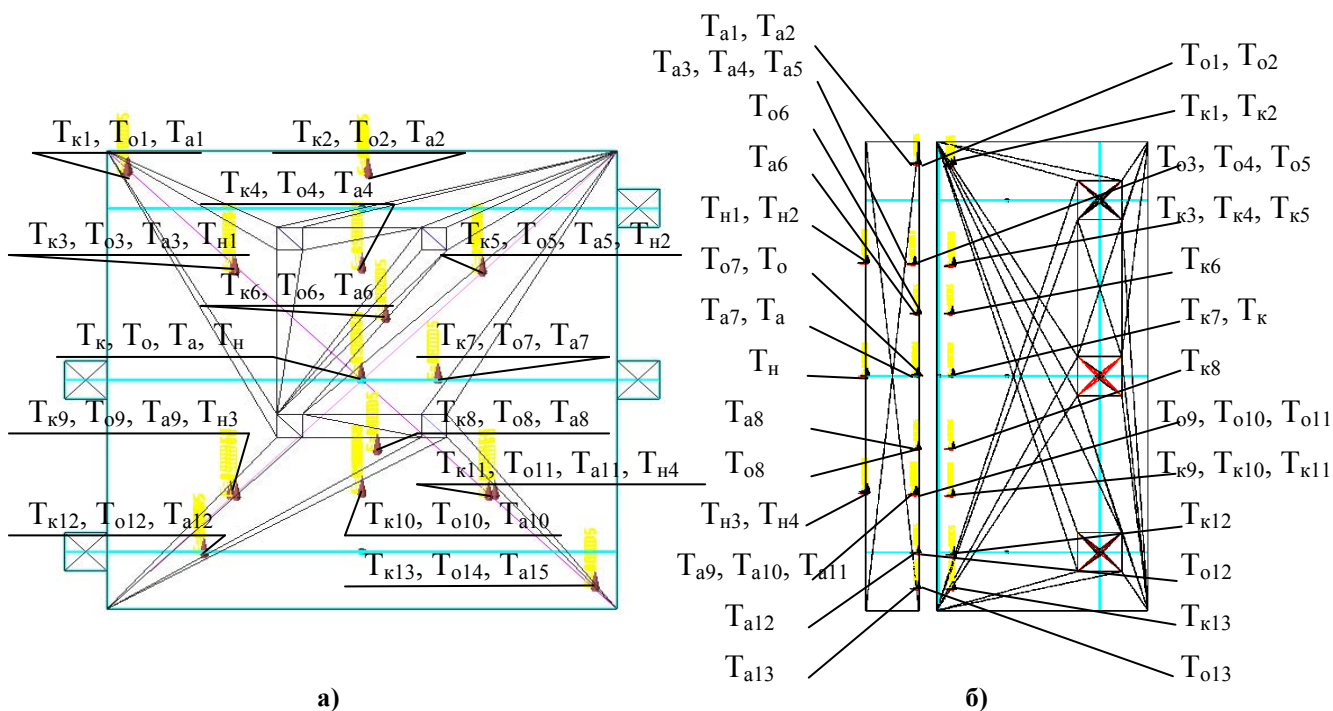


Рисунок 5 – Точки контроля температуры модели печи Лаборатории 2: T_a, T_k, T_n, T_o – точки контроля температуры; а – вид по оси Y; б – вид по оси Z

На рис. 6 – рис. 8 показаны графики, полученные по результатам вычислительных экспериментов.

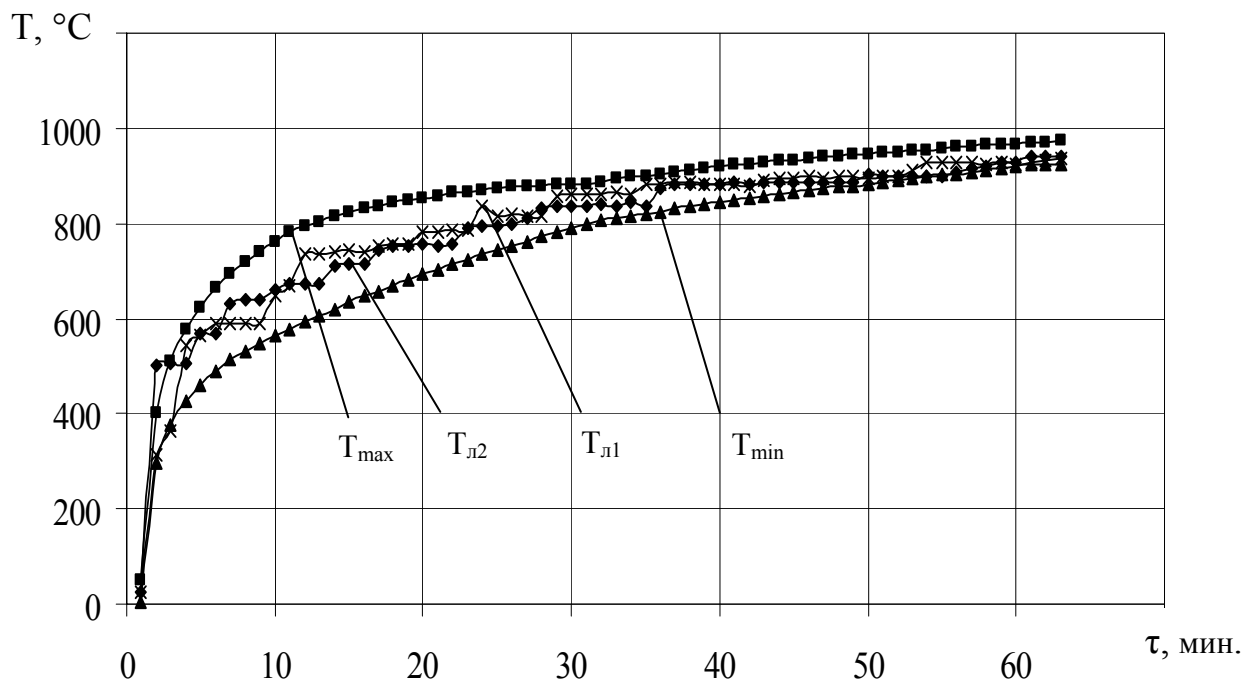


Рисунок 6 – График изменения температуры на поверхности смоделированной термопары в камерах вертикальных огневых печей: $T_{\text{л}1}$ – показатели смоделированной термопары в камере печи Лаборатории 1 (рис. 1, рис. 2, рис. 4); $T_{\text{л}2}$ – показатели смоделированной термопары в камере печи Лаборатории 2 (рис. 1, рис. 3, рис. 5); T_{\max} – верхний предел испытаний; T_{\min} – нижний предел испытаний

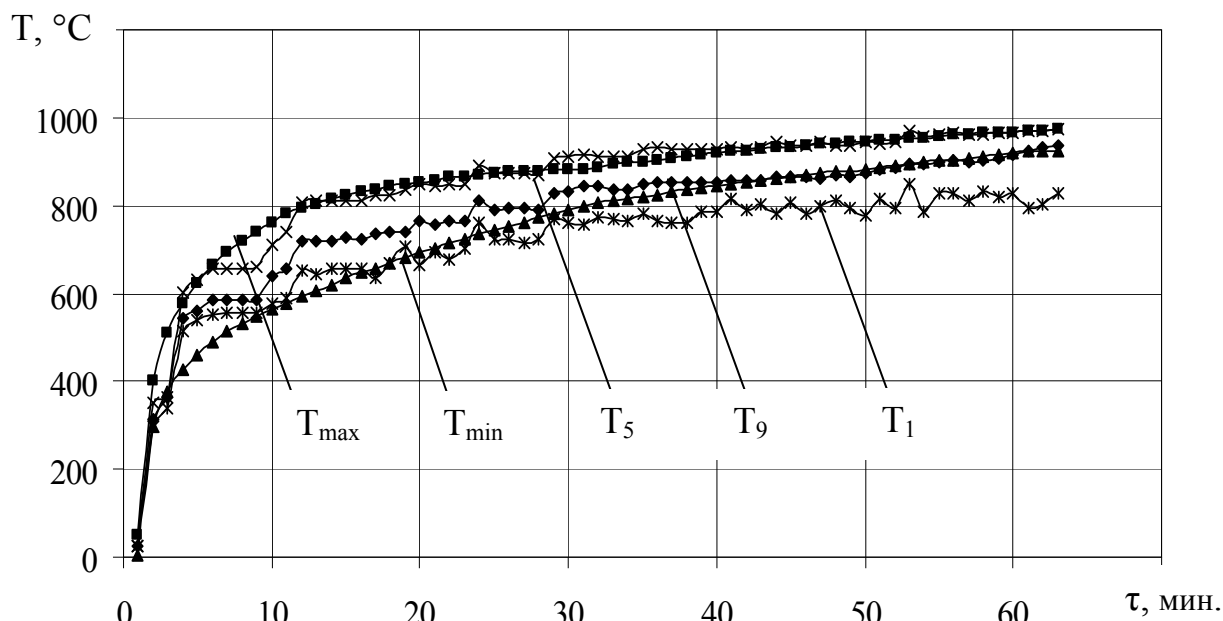


Рисунок 7 – График изменения температуры в разных контрольных точках камеры вертикальной печи Лаборатории 1: T_{\max} – верхний предел испытаний; T_{\min} – нижний предел испытаний; T_5 – показатели температуры в верхней части печи; T_9 – показатели температуры в средней части печи; T_1 – показатели температуры в нижней части печи (рис. 4)

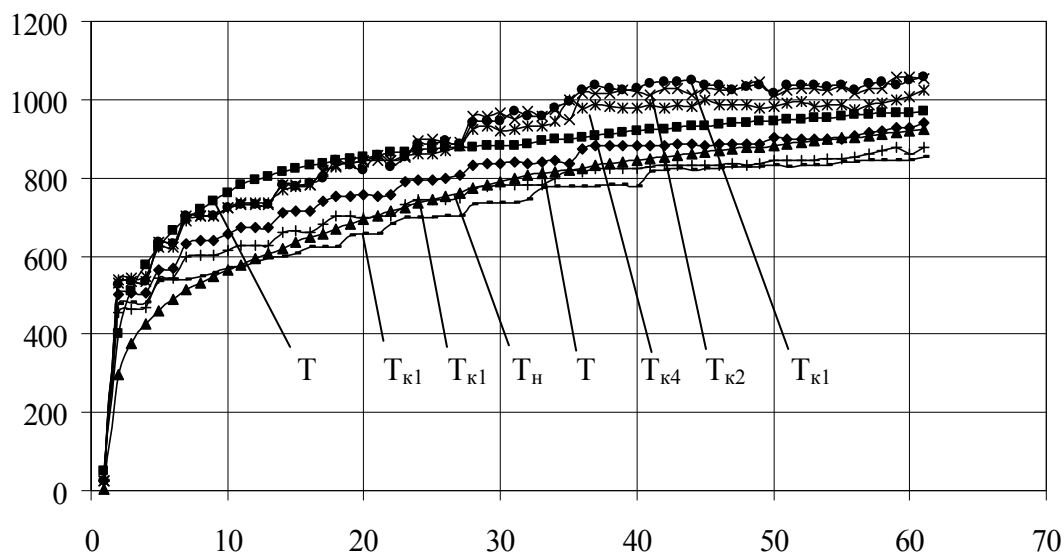
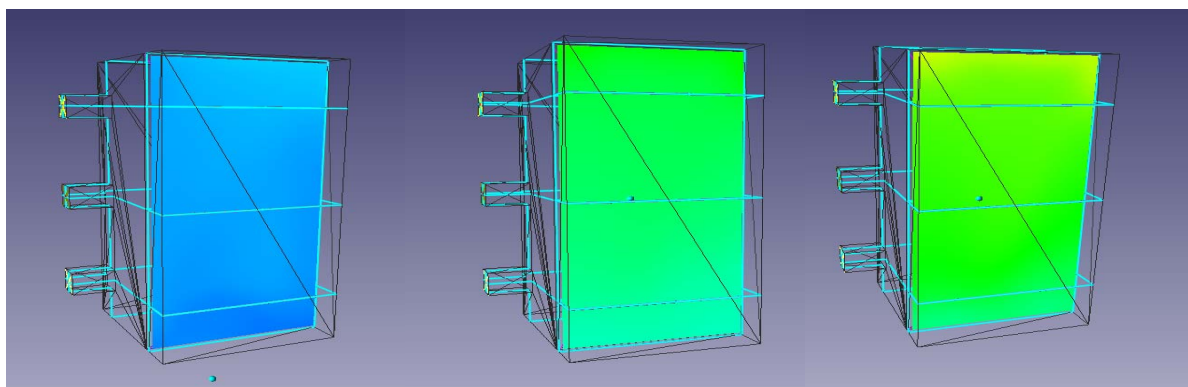
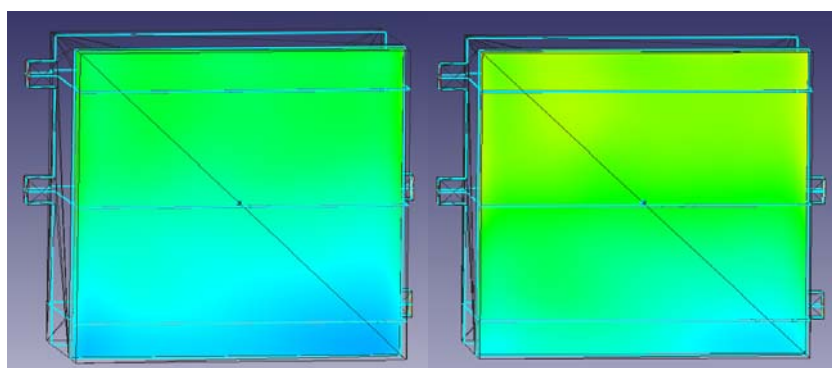


Рисунок 8 – График изменения температуры в разных контрольных точках камеры вертикальной печи Лаборатории 2: T_v – верхний предел испытаний; T_n – нижний предел испытаний; $T_{к1}$, $T_{к2}$ – показатели температуры в верхней части печи; $T_{к3}$, $T_{к4}$ – показатели температуры в средней части печи; $T_{к12}$, $T_{к13}$ – показатели температуры в нижней части печи (рис. 5)



а) б) в)

Рисунок 9 – Распределение температур на обогреваемой поверхности несущей стены при моделировании испытаний в печи Лаборатории 1: а – 10-я минута испытаний; б – 30-я минута испытаний; в – 60-я минута испытаний



а б

Рисунок 10 – Распределение температур на обогреваемой поверхности несущей стены при моделировании испытаний в печи Лаборатории 2: а – 30-я минута испытаний; б – 60-я минута испытаний

Таблица 2 – Температура (на расстоянии 100 мм от несущей стены) по результатам вычислительных экспериментов в разных местах камер вертикальных испытательных печей

Размещение контрольной точки	Согласно [1]	Лаборатория 1	Лаборатория 2
На 60-й минуте испытаний:			
Внутри смоделированных термопар	от 922 до 969 °С	≈ 937 °С	≈ 942 °С
Непосредственно рядом с термопарами		≈ 924 °С	≈ 928 °С
В верхней части камер печей		≈ 968 °С	≈ 1057 °С
В нижней части камер печей		≈ 828 °С	≈ 851 °С
На 30-й минуте испытаний:			
Внутри смоделированных термопар	от 800 до 884 °С	≈ 860 °С	≈ 837 °С
Непосредственно рядом с термопарами		≈ 844 °С	≈ 839 °С
В верхней части камер печей		≈ 914 °С	≈ 968 °С
В нижней части камер печей		≈ 757 °С	≈ 735 °С

Таблица 3 – Температура (на уровне арматуры) по результатам вычислительных экспериментов в разных местах камер вертикальных испытательных печей

Размещение контрольной точки	Согласно [7]	Лаборатория 1	Лаборатория 2
На 60-й минуте испытаний:			
Непосредственно рядом с термопарами	<500 °С	≈ 285 °С	≈ 283 °С
В верхней части камер		≈ 284 °С	≈ 226 °С
В нижней части камер		≈ 253 °С	≈ 297 °С
На 30-й минуте испытаний:			
Непосредственно рядом с термопарами	<500 °С	≈ 165 °С	≈ 184 °С
В верхней части камер		≈ 149 °С	≈ 185 °С
В нижней части камер		≈ 193 °С	≈ 151 °С

Выводы. Учитывая проведенные исследования можно сделать следующие выводы.

1. Построены математические модели вертикальных печей для испытаний несущих стен на основе полной системы уравнений Навье-Стокса с помощью программного комплекса CFD FlowVision 2.5.

2. В соответствии с проведенными опытами показатели температуры рядом с термопарой отличаются от показателей самой термопары. Для Лаборатории 1 $\Delta T \approx 12,8$ °С, а для Лаборатории 2 – 14,1°С. При этом, если учесть погрешность термопары ≤ 15 °С [1]), то суммарная погрешность может составлять ≈ 27 –30°С. Поскольку испытания проходят в течение длительного времени, это сказывается на достоверности и точности полученных результатов.

3. Температура в камере огневых печей распределяется неравномерно. В верхней части камеры печи превышает пределы испытаний, а в нижней необходимая температура в нужный промежуток времени не достигается. Разница температур на 60-й минуте составляет 140,4°С и 205,6°С для лабораторий 1 и 2 соответственно.

4. Указанные особенности могут влиять на адекватность результатов испытаний несущих стен.

Перспективы дальнейших исследований. Провести дополнительные опыты с помощью математического моделирования и усовершенствовать нормативные документы по требованиям к конструктивным особенностям и метрологического обеспечения огневых печей установок для испытаний на огнестойкость несущих стен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Защита от пожара. Строительные конструкции. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования (ISO 834: 1975) ДСТУ Б В.1.1-4-98. – [Введен 1998-10-28]. – К.: Укрархстройинформ, 1999. – 21 с. – (Государственный стандарт Украины). ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. – 2000.
2. Защита от пожара. Пожарная безопасность объектов строительства. ДБН В.1.1-7-2002. – [Введен 2003-05-01]. – К.: Госпожбезопасности, 2003. – 87 с. – (Государственные строительные нормы).
3. Згуря, В.И. Совершенствование системы определения пожароопасных свойств веществ, мате-

- риалов и строительных конструкций: Автореф. дис. на соискание ученой. степени канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожарная безопасность» / В.И. Згуря – Киев, 2007. – 21 с.
4. Нуянзин, А.М. Анализ существующих математических моделей тепломассообмена в камерах огневых печей установок для испытаний на огнестойкость несущих стен / А.М. Нуянзин, С.В. Поздеев, С.А.Сидней. Сборник научных трудов АПБ им. Героев Чернобыля № 18 2014 год. Серия КВ № 13745-2719.
 5. Новак, С.В. Методы испытаний строительных конструкций и изделий на огнестойкость / С.В. Новак, Л.М. Нефедченко, А.А. Абрамов. – К.: Пожинформтехника, 2010. – 132 с.
 6. Система моделирования движения жидкости и газа. FlowVision Версия 2.5.4. Руководство пользователя. – Москва: ТЕСИС. – 2008. – 284 с.
 7. EN 1992-1-2: 2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels 2004.