

УДК 614.84+532.517.4

Круковский П.Г., Рассамкин А.Б., Полубинский А.С.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ “КОРОБ-КАБЕЛЬ” В УСЛОВИЯХ СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ИХ ОГНЕСТОЙКОСТИ

У роботі сформульована проблема забезпечення функціонування кабельних трас систем безпеки, які розміщені у гермозоні ядерного реактора АЕС, в умовах пожежі. Запропоновано математичну модель, що описує тепловий стан системи "короб-кабель" в умовах стандартної пожежі. Проведено ідентифікацію параметрів моделі, використання їх значень дало змогу порівняти розраховані значення температурних полів з експериментально отриманими залежностями температури від часу в різних точках досліджуваної системи. На підставі отриманих результатів, запропоновано оптимальні товщини різних вогнезахисних покриттів, що задовольняють необхідної вогнестійкості конструкції.

В работе сформулирована проблема обеспечения функционирования кабельных трас систем безопасности, размещенных в гермозоне ядерного реактора АЭС, в условиях пожара. Предложена математическая модель, которая описывает тепловое состояние системы "короб-кабель" в условиях стандартного пожара. Проведена идентификация параметров модели. Полученные их значения позволили сравнить расчетные значения температурных полей с экспериментальными зависимостями температуры от времени в различных точках исследуемой системы. На основании полученных результатов, предложены оптимальные толщины различных огнезащитных покрытий, которые удовлетворяют требуемой огнестойкости конструкции.

The problem of maintenance of functioning cable trays of systems of safety in containment of the atomic power station, in conditions of a fire is formulated in work. The mathematical model, which describes a thermal condition of system «duct -cable» in conditions of a standard fire, is offered. Identification of parameters of model is realized, using which values has allowed comparing settlement values of temperature fields and comparison to experimentally received dependences of temperature on time in various points of researched system. On the basis of the received results, optimum thickness of various fireproof coverings which satisfy required fire resistance of a design are offered.

c – теплоемкость;
 n – нормаль;
 T – температура;
 x, y, z – координаты;
 α – коэффициент теплоотдачи;

ε – степень черноты;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 ρ – плотность;
 σ – постоянная Стефана-Больцмана;
 τ – время.

Введение

В соответствии с действующими в Украине «Правилами проектирования систем аварийного электроснабжения атомных станций (ПНАЭГ-9-027-91)» [1], «Основные кабельные трассы разных каналов систем безопасности в гермозоне, находящиеся в общем помещении, следует прокладывать в металлических коробах. При прокладке кабелей, не распространяющих горение, короба должны покрываться по наружной поверхности

огнезащитным составом огнестойкостью 1,5 часа каждый». В настоящее время это требование не выполняется как на действующих, так и на строящихся АЭС поскольку кабели прокладываются в металлических коробах без огнезащитного покрытия. Одной из причин этого является отсутствие научно обоснованного и проверенного на практике (путем испытаний) технического решения по огнезащите кабельных коробов, которое удовлетворяло бы как требованиям по огнестой-

кости (1,5 часа) так и по тепловому режиму кабелей в условиях их нормальной эксплуатации. Имеются только рекомендации ряда иностранных фирм, таких как АО «Дунаменти» (Венгрия), СВТ «Брандшущ» (Германия), однако эффективность этих рекомендаций испытаниями не подтверждена.

В данной работе рассматривается система «короб-кабель», которая представляет собой совокупность кабелей расположенных в металлическом корпусе с верхней крышкой. Под огнестойкостью такой системы понимают свойство системы обеспечивать сохранение функционирования кабелей, размещенных в коробе, в условиях внешнего пожара. Температура, при которой хотя бы один кабель в коробе теряет способность функционировать (то есть выходит из строя) называется пределом огнестойкости системы «короб-кабель».

В работе приведены результаты численного моделирования и натурных испытаний в огневой печи системы «короб-кабель», на основании которых выполнен анализ огнестойкости ряда типовых систем, используемых в гермозоне ядерного реактора. Полученные результаты в дальнейшем можно будет использовать для научно-обоснованных конструктивных решений по огнезащите кабельных коробов, которые удовлетворяли бы требованиям по огнестойкости.

Приведенные ниже исследования базируются на расчетно-экспериментальном подходе [2], ко-

торый включает в себя анализ, оптимизацию и прогнозирование исследуемых процессов тепло-массообмена на основе компьютерной (расчетной) модели, адекватность которой реальному процессу обеспечивается с помощью параметрической идентификации и экспериментальной информации об этом процессе. В дальнейшем использование компьютерной модели позволяет находить наиболее оптимальные по своим параметрам технические решения по огнезащите системы «короб-кабель». С технико-экономической точки зрения применение данного подхода позволит уменьшить стоимость получения результатов за счет увеличения доли расчетных работ и обоснованном уменьшении количества экспериментальных испытаний, что соответствует общемировой тенденции.

Описание системы «короб-кабель»

Исследовались две системы «короб-кабель» с коробами типа КП, имеющими толщину стенок 2 мм, высоту – 0,15 м, ширину – 0,4 м и длину – 2,8 м. Одна из систем не содержала внешнего огнезащитного покрытия (рис. 1), другая была снабжена внешней по коробу защитой из гипсовых плит фирмы «Браншущ» толщиной 40 мм. В коробе размещалось 6 кабелей следующих типов, используемых в гермозоне реакторов типа ВВЭР – 1000: силовой – ПвБВнг 3 × 50 + 1 × 25 – 2 шт. и контрольные – КПоБВнг 7 × 2.5 – 2 шт. и КПоЭВнг 14 × 2.5 – 2 шт.

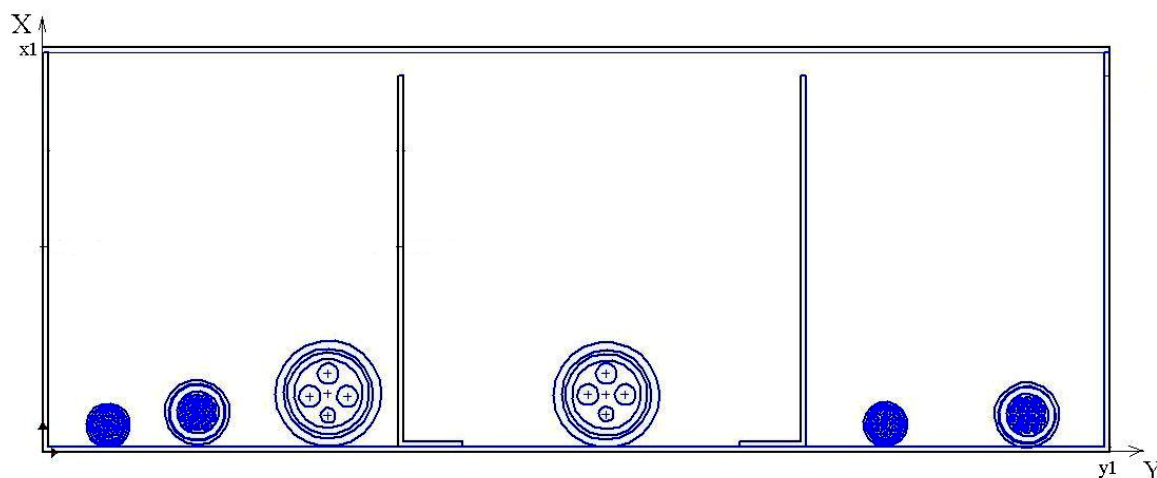


Рис. 1. Схема системы «короб-кабель» без огнезащитного покрытия.

Силовые кабели типа ПвБВнг имеют изоляцию из вулканизированного полиэтилена и поливинилхлоридного (ПВХ) пластика пониженной горючести, не распространяющей горение. Контрольные кабели предназначены для эксплуатации в сетях переменного тока 100 Гц напряжением до 660 В и в сетях постоянного тока напряжением до 1000 В [3]. В соответствии с [4] (п. 1.6.5 ТУ), кабель должен 10 раз выдерживать режим до 10 час при температуре среды до 150 °С. Объем горючей массы на 1 м длины составляет 7 л.

Испытания проводились АОО «ТЕСТ» на стационарной огневой печи, где был создан стандартный тепловой режим согласно требованиям ДСТУ Б В.1.1-4-98-98 [5]. Печь была оснащена четырьмя горелками, включены были только две из них, расположенные диагонально. Короб с огнезащитной заделкой на торцах был размещен поперек пространства печи.

Физическая и математическая модели

Рассматривалось нестационарное тепловое состояние системы “короб-кабель” с учетом радиационно-конвективного теплообмена наружных поверхностей короба с окружающей средой, температура которой изменяется по закону стандартного пожара. Между внутренними стенками короба, перегородками и кабелями имеет место

радиационный теплообмен. Теплофизические характеристики огнезащитного покрытия зависят от температуры. Задача решалась в двумерной постановке ввиду отсутствия градиента температуры в продольном направлении z

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(c\rho T) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (1)$$

где

$0 < x < x_1$ мм; $0 < y < y_1$ мм; $0 < \tau < \tau_{\max} = 90$ мин;
 $T=T(x, y, \tau)$, $c=c(x, y, T)$, $\rho=\rho(x, y, T)$, $\lambda_x=\lambda_x(x, y, T)$, начальное условие

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \quad (2)$$

граничное условие на наружной поверхности короба

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_f) + \sigma \epsilon [T^4 - T_0^4] \quad (3)$$

$$T_f = T_0 + T_1 \lg(A\tau + 1), \quad (4)$$

где $T_1 = 345$ К, $A = 0,133$ с⁻¹.

Уравнение (1) записано для всех подобластей области решения, различие физических свойств при этом учитываются коэффициентами c , ρ , λ , которые являются функциями координат. Выражение (4) описывает кривую стандартного пожара, коэффициент теплоотдачи на внешней стенке короба выбирался равным 25 Вт/(м²·К) [3].

В модели (1)-(4) приняты следующие допущения:

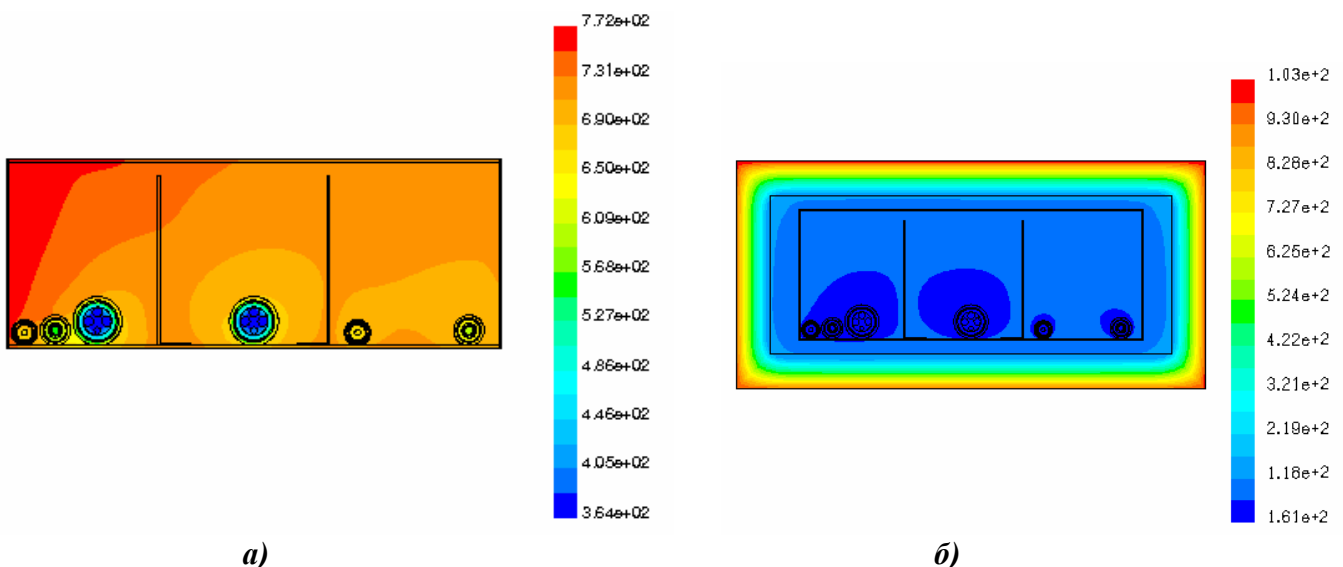


Рис. 2. Поля температур в системе “короб-кабель” для моментов времени: а) без огнезащитного покрытия - 22-минута; б) с огнезащитным покрытием - 90-минут.

1. Контрольные кабели рассматриваются как многослойная коаксиальная структура с эквивалентными тепловыми характеристиками слоев.

2. Тепловыделения, вызванные токовыми нагрузками в жилах контрольных кабелей, не учитываются, поскольку они незначительны.

Численное решение уравнений (1)-(4) осуществлялось с помощью метода конечных элементов в программной среде ANSYS, при этом общее количество элементов компьютерной модели системы "короб-кабель" с огнезащитным покрытием составило 50451, количество узлов – 31109. Построенная конечно-элементная сетка учитывала особенности расположения кабелей, а также имела соответствующее сгущение у стенок и перегородок короба. Шаг по времени при решении нестационарных задач, выбирался в диапазоне 0.5-10 с, число итераций на каждом шаге составило 7-50, число шагов по времени – 60-2000.

На рис. 2а приведен результат расчета распределения температур в системе "короб-кабель" для варианта без огнезащитного покрытия короба.

Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования

На рис. 3-5 представлены зависимости температуры от времени в наиболее характерных точках системы "короб-кабель" с огнезащитным покрытием из гипсовых плит толщиной 40 мм. На рис. 3 представлены температурные кривые для двух точек в печном пространстве, а также на нижней стенке короба и на внутренней поверхности гипсовой изоляции. На рис. 4 и 5 показаны зависимости температуры от времени, измеренные на поверхности и в центре контрольных кабелей типа КпоБВнг 7 × 2.5 и КПоЭВнг 14 × 2.5, соответственно. На графиках также приведены расчетные значения для соответствующих точек, маркированные индексом model.

В ходе идентификации модели были определены параметры, которые в дальнейшем корректировались и уточнялись на основании имеющихся экспериментальных данных с целью достижения максимальной корреляции с экспериментом. Эффективная теплопроводность воздуха

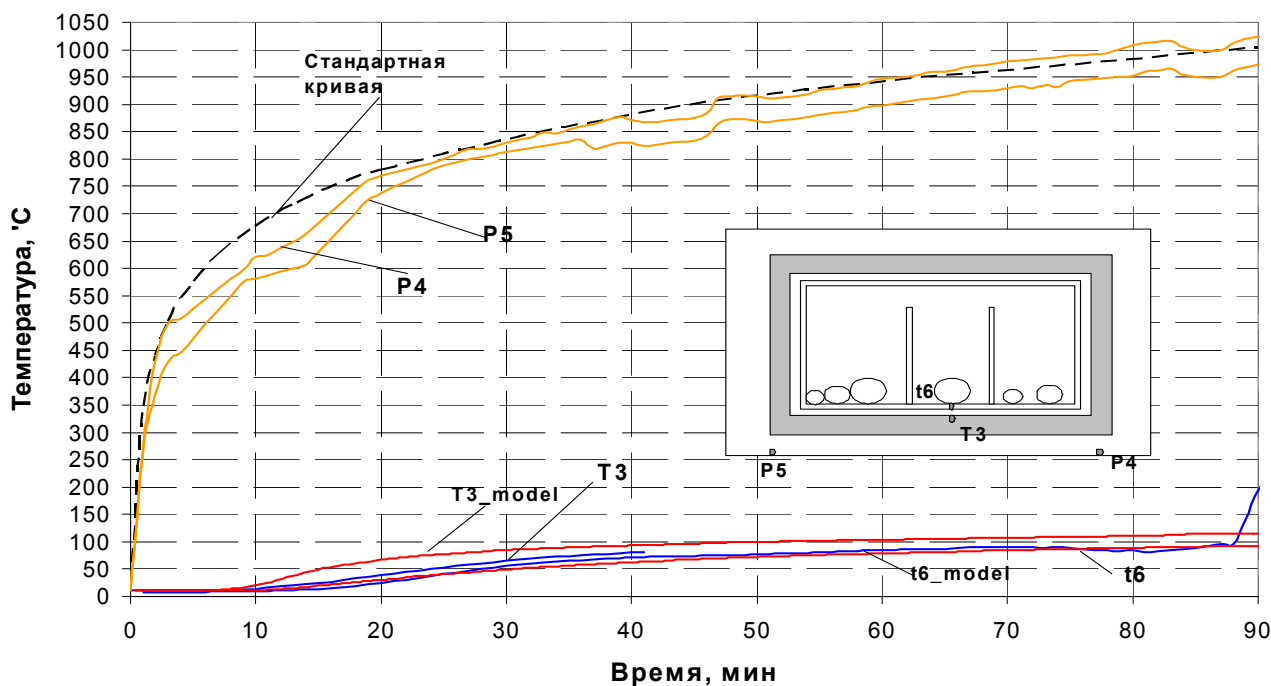


Рис. 3. Зависимости температуры от времени в печном пространстве (точка P4 и P5), на на внутренней поверхности металлического короба (точка t6), на внутренней стенке огнезащитных гипсовых плит (точка T3).

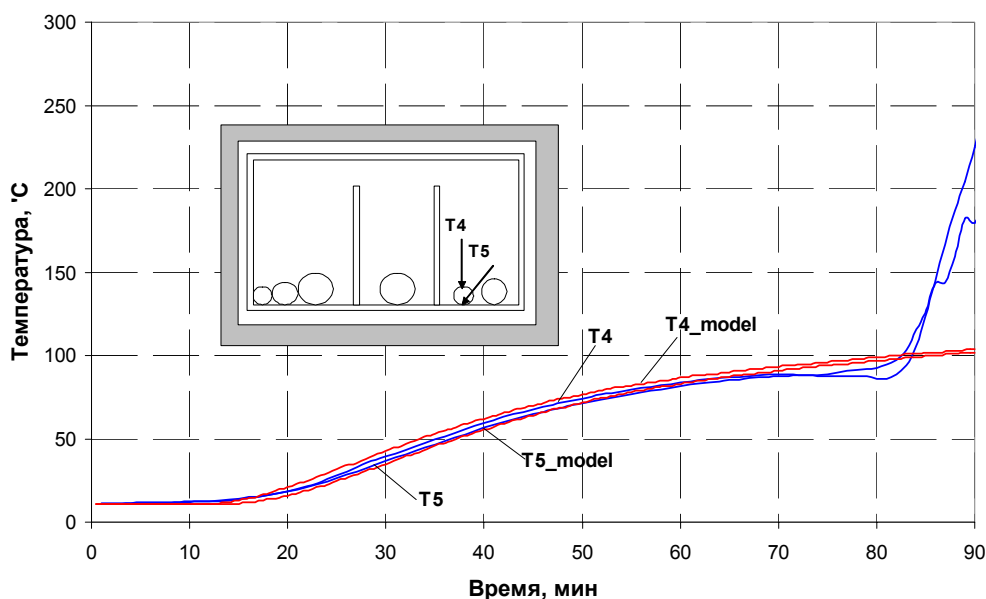


Рис. 4. Зависимости температуры от времени на контрольном кабеле типа КпоБВнг 7 × 2.5, расположенном в боковом отсеке системы "короб-кабель" на поверхности (точка T4) и внутри (точка T5).

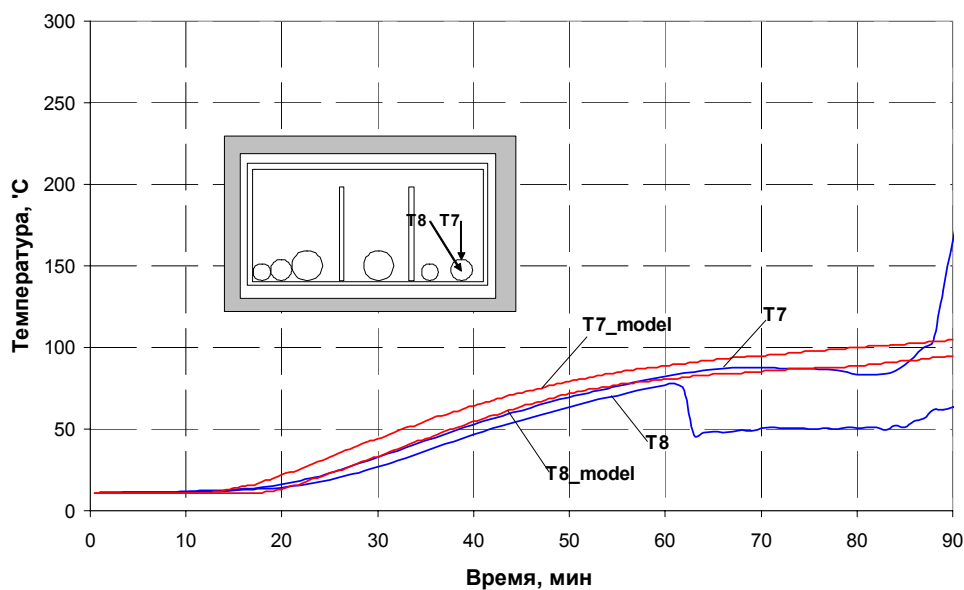


Рис. 5. Зависимости температуры от времени на контрольном кабеле типа КПоЭВнг14 × 2.5, расположенном в боковом отсеке системы «короб – кабель» на поверхности (точка T7) и внутри (точка T8).

внутри короба была определена на уровне $0,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ (коэффициент теплопроводности воздуха при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $0,024 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$). Правомерность найденного значения коэффициента теплопроводности можно объяснить наличием в объеме короба интенсивного выделения пиролизных газов, что заметно интенсифици-

рует процесс теплоотдачи от нагретых стенок к кабелям, а также наличием радиационного теплообмена внутри короба. Были также найдены различные значения степени черноты на внешних стенках короба, учитывающие неравномерное тепловое воздействие факела в печи.

Сравнивая экспериментальные и расчетные температурные кривые, можно констатировать удовлетворительную для инженерных расчетов корреляцию (отличие до $\pm 20\%$). Существенное расхождение в некоторых точках связано с событиями, возникшими в ходе эксперимента. Так на 84-й минуте произошел срыв верхней крышки огнезащитного короба, поэтому на рис. 4 и рис. 5 ясно наблюдается скачок температур.

Таким образом на основании данных, полученных из эксперимента, была проведена идентификация и верификация разработанных компьютерных моделей для систем “короб-кабель”, которая показала удовлетворительную точность расчетов, что дало возможность использовать модели для последующего анализа технических решений по огнезащите систем “короб-кабель”.

Анализ результатов и определение оптимальных технических решений

Рассматривая вопрос оптимальных технических решений по обеспечению требуемой огнестойкости систем “короб-кабель” в условиях стандартного пожара, следует отметить, что концептуальным техническим решением, обеспечивающим заданную огнестойкость равную 1,5 часа, является теплоизоляция наружной поверхности короба огнезащитным покрытием (так называемая пассивная защита). Такое решение может быть достигнуто с помощью применения различных материалов, которые удовлетворяют требованиям, предъявляемым к огнезащитным материалам, используемым для защиты от пожара системы “короб-кабель” в гермозоне реактора АЭС. Материалы, для которых известны теплофизические характеристики, были использованы при

Таблица

№ п/п	Наименование материала, (фирма-производитель или поставщик, страна)	Наличие информации о теплофизических свойствах материала	Оптимальная толщина материала, необходимая для обеспечения огнестойкости 1,5 часа, мм	Технологичность применения материала к огнезащите коробов на действующих блоках АЭС	Масса 1 м ² покрытия при заданной оптимальной толщине материала, кг
1	Гипсовые плиты PIRO-SAFE (CBT «Браншц», Германия)	Есть	34	Сложный монтаж твердых плит вдоль коробов с применением спец. арматуры	32,3
2	Гипсовые плиты (Каменец-Подольский з-д строит. материалов, Украина)	Нет	-	То же	-
3	Плита вермикулитоси-катная «Минпласт» (ЗАО «Оболонь-КСВ», Украина)	Есть	45	То же	33,8
4	Супертонкое базальтовое волокно (Ирпенский з-д изоляционных материалов, Украина)	Есть (приблизительно)	115	Упрощенная укладка и закрепление матов или эластичных рулонов на коробах	11,5
5	Материал E-50, Фирма PCI-PROMATEC, США (представитель в Украине - НПК «АСКЕНН», г. Черкассы)	Есть (приблизительно)	44	Упрощенная обмотка эластичными рулонами по спирали поперек коробов	39,1
6	Войлок муллиток-ремнеземистый марки МКРВЧ-250, ОАО «Северский комбинат» (г. Северск, Украина)	Есть	-	То же	-

расчетах оптимальных толщин (табл. 1), необходимых для обеспечения огнестойкости системы «короб-кабель». При этом 1,5 часа – время, за которое температура на самом малом контрольном кабеле станет равной пределу огнестойкости, найденному экспериментально и равному 190 °С). Эти расчеты были выполнены с помощью разработанных компьютерных моделей, достоверность которых подтверждена описанным выше экспериментом.

Заключение

Предложенный в статье перечень огнезащитных материалов и их оптимальных толщин (см. табл.) были получены в соответствии с требованием обеспечения заданной огнестойкости, равной 1,5 часа и могут оказаться достаточно консервативными и дорогими по следующим причинам:

1. Уровень температур от горящих кабелей в коробе гермозоны реакторного отделения АЭС а также продолжительность пожара не достигает уровня температур и продолжительности, соответствующих кривой стандартного пожара вследствие малого объема горящих кабелей и очень большого объема помещения гермозоны.

2. Обеспечение огнестойкости каждого короба системы безопасности на уровне 1,5 часа означает 3-х часовую огнестойкость одного короба от дру-

гого, что в 2 раза превосходит требуемую огнестойкость.

3. Предложены оптимальные толщины различных огнезащитных покрытий, которые удовлетворяют требуемой огнестойкости конструкции.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск и обоснование менее консервативных и более рациональных и дешевых технических решений, для условий, отличных от условий нагрева стандартного пожара.

Перечень огнезащитных материалов и оптимальных толщин, предлагаемых для обеспечения 1,5 часовой огнестойкости систем «короб кабель»

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНАЭГ-9-027-91. Правила проектирования систем аварийного электроснабжения атомных станций.
2. Круковский П.Г. Обратные задачи тепло - массопереноса (общий инженерный подход). К.: ИТТФ НАН Украины, 1998.– 224с.
3. Правила устройства электроустановок ПУЭ-76, СНИП III-33-76 1977г.
4. Инструкции по устройству сетей заземления в электроустановках – СН 102-76.
5. ДСТУ Б В.1.1-4-98 Защита от пожара. Строительные конструкции. Методы испытаний на огнестойкость.

Получено 03.09.2004 г.