

УДК 614.841

И.А. Харченко, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., С.В. Новак, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., В.В. Коваленко, П.Г. Круковский, д-р техн. наук, проф., А.Б. Рассамкин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ КОРОБЕ В УСЛОВИЯХ СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА

Приведены результаты экспериментальных исследований огнестойкости и предела огнестойкости кабельных линий систем безопасности, применяемых в гермозонах АЭС в условиях стандартного температурного режима без огнезащитного покрытия короба, а также с огнезащитным покрытием из гипсовых плит. Найден предел огнестойкости и предельные температуры функционирования для всех электрических кабелей кабельных линий. Исследовано влияние темпа нагрева на предельную температуру функционирования электрического кабеля.

В действующих в Украине нормах проектирования систем аварийного электроснабжения атомных станций [1] сказано: «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» (п. 5.16).

В настоящее время требование «покрывать кабели огнезащитным составом» на действующих АЭС не выполняется. Кабели прокладывают в металлических коробах без огнезащитного покрытия. Основной причиной этого является отсутствие научно обоснованных и прошедших испытание технических решений по защите от пожара кабельных линий, удовлетворяющих требованию по огнестойкости (1,5 часа).

В указанном документе идет речь об «огнестойкости огнезащитного состава» покрытия короба, но не отражены требования, предъявляемые к огнестойкости кабельной линии. Также не указана величина предела огнестойкости кабельной линии.

Под *кабельной линией*, следует понимать линию, предназначенную для передачи электроэнергии или отдельных ее импульсов, которая состоит из одного или нескольких электрических кабелей и металлоконструкций (арматура, короба и др.), служащих для их прокладки, проложенных определенным способом.

Под *огнестойкостью кабельной линии* понимается способность кабельной линии, проложенной определенным способом, сохранять функциональность в условиях пожара.

Предел огнестойкости кабельной линии – показатель огнестойкости, определяемый временем от начала огневого испытания при стандартном температурном режиме до наступления нормированного для кабельной линии предельного состояния по огнестойкости.

Предельным состоянием по признаку потери функционирования кабельной линии, является состояние, при котором возникает короткое замыкание между жилами кабелей или между жилами кабелей и металлическими частями короба, лотка, трубы и т. п., или обрыв одной или больше жил.

Предельная температура функционирования кабеля – минимальная температура потери функционирования электрического кабеля вследствие короткого замыкания.

Как показывает обзор литературных данных предельная температура для электрических кабелей США, лежащих в лотках во время испытаний, составляет 182°C [2–4]. Предельной температурой при пожаре электрических кабелей в коробах в Германии считают 120°C (данные фирмы СВТ «Браншутц»). Существенные различия в значении этой температуры, которая зависит от большого количества конструктивных и технологических параметров кабельных линий, а также необходимость определения предела огнестойкости наиболее типичных для украинских АЭС типов кабельных линий, показывают необходимость

проведення спеціальних експериментальних досліджень. На Україні до настоящего времени подобные испытания не проводили и проблема защиты от пожара кабельных линий на действующих АЭС от воздействия пожара стоит очень остро.

Целью данной работы является экспериментальное определение огнестойкости и предела огнестойкости кабельной линии в условиях стандартного температурного режима для линий без огнезащитного покрытия короба и с огнезащитным покрытием из гипсовых плит.

Испытания проводились УкрНИИПБ МЧС Украины совместно с ИТТФ НАН Украины на стационарной огневой печи испытательного центра ООО «Тест», в которой были созданы условия, соответствующие стандартному пожару.

В испытаниях исследовались две кабельные линии на основе коробов типа КПСС толщиной стенок 2 мм (высота – 0,15 м, ширина – 0,4 м, длина – 2,8 м). Одна из линий не содержала внешнего огнезащитного покрытия (рисунок 1), другая была снабжена внешней по коробу защитой из гипсовых плит фирмы «Браншутц» (толщина – 0,4 м). В коробе размещали 6 электрических кабелей следующих типов, которые наиболее часто используются в гермозоне реактора типа ВВЭР-1000:

- силовые кабели [5] – ПвБВнг 3×50 + 1×25 – 2 шт;
- контрольные кабели [6] – КПоБВнг 7×2,5 – 2 шт и КПоЭВнг 14×2,5 – 2 шт.

Силовые кабели типа ПвБВнг имеют изоляцию из вулканизированного полиэтилена и поливинилхлоридного (ПВХ) пластика пониженной горючести, не распространяющей горение. 4-жильные кабели имеют 3 жилы одинакового сечения и одну (нулевую) меньшего сечения, рассчитаны на напряжение 1 кВ. Основные параметры кабелей типа ПвБВнг приведены в ТУ [5].

Контрольные кабели предназначены для эксплуатации в сетях переменного тока 100 Гц напряжением до 660 В и в сетях постоянного тока напряжением до 1 кВ [6]. В соответствии с п. 1.6.5 ТУ кабель должен 10 раз выдерживать режим: 10 часов при температуре окружающей среды до 150°C. Количество горючей массы на 1 м длины составляет 7 л.

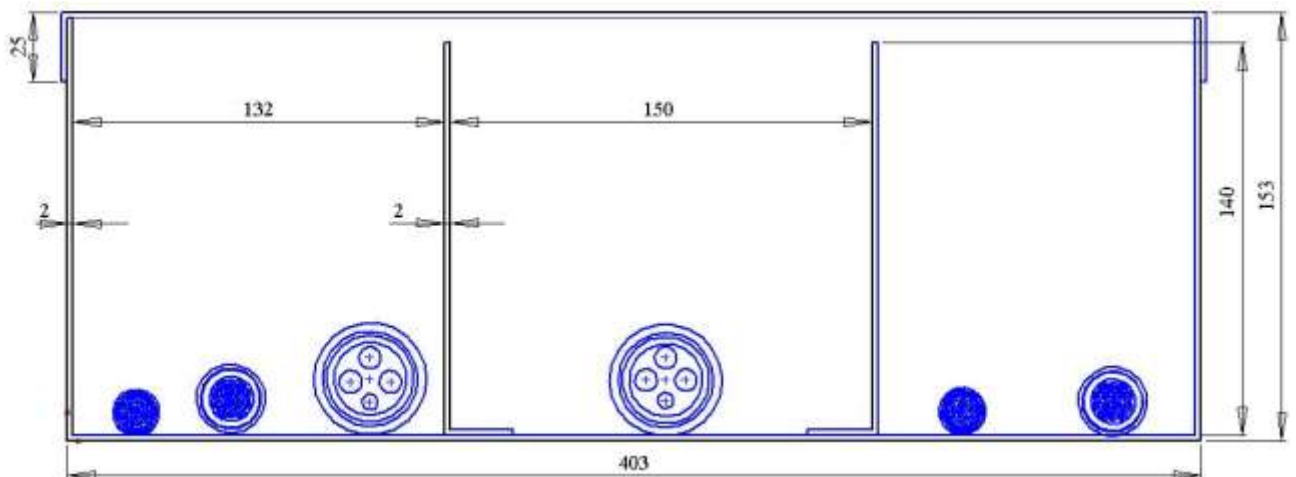


Рисунок 1 – Испытуемая кабельная линия без огнезащитного покрытия

Для проведения испытаний использовались следующие средства: огневая печь, кабельные линии, измерительные устройства, оборудование для фотосъемок. Печь обеспечивала стандартный температурный режим и избыточное давление в рабочем пространстве печи в соответствии с ДСТУ [7]. Зависимость температуры от времени, соответствующая стандартному режиму пожара, имеет вид:

$$T_s = 20 + 345 \lg(8t + 1), \quad (1)$$

где t – время от начала эксперимента, мин;

T_s – средняя температура в печи, соответствующая времени t , °С.

Среднюю температуру T_s определяли как среднее арифметическое показаний термопар в пространстве печи. Допустимое отклонение средней температуры от расчетной не должно превышать значений, указанных в п. 6.1.2 ДСТУ [8]. Инструментальная погрешность термопар не более $\pm 4^\circ\text{C}$. Для измерения температуры в печи использовали термопары типа ТХА диаметром 1,5 мм в защитном кожухе (диапазон измерения от 0 до 1200°C). Для исследования температурного поля на стенках короба, на жилах и оболочках кабелей устанавливали термопары типа ХА диаметром 0,75 мм (диапазон измерения от 0 до 600°C). Измерительный спай термопары припаивали к медному диску диаметром 12 мм и толщиной 1 мм, который располагали на поверхности, температуру которой контролировали и накрывали квадратной накладкой 30×30 мм из базальтового картона. При наличии огнезащиты термопары устанавливали в следующих местах кабельной линии:

- на внутренней поверхности каждой стенки по середине ее длины – 4 шт;
- на внутренней жиле и на поверхности оболочки силового кабеля – 2 шт и контрольных кабелей – 4 шт;
- термопары в печи Р1...Р6 – 6 шт;
- термопары на изоляции Т1...Т4 – 4 шт.

Всего – 20 шт термопар (рисунок 2). Контроль температуры для кабельной линии без огнезащитного покрытия осуществляли в тех же местах, но без термопар на огнезащите. Всего – 16 шт.

Испытуемые образцы в печи располагали таким образом, чтобы расстояние от них до стены, пола и потолка печи было не более 0,2 м. Места выхода коробов из печи и их торцы уплотняли базальтовой ватой. Короб размещали таким образом, чтобы отсутствовало прямое воздействие пламени горелок печи.

Жилы контрольных кабелей соединяли последовательно и подключали к однофазному источнику напряжения через предохранители и выключатели. Для индикации целостности цепи использовали подключенные последовательно сигнальные электрические лампы.

Все жилы силовых кабелей объединили в три группы и соединили последовательно. Через предохранители их подключили к трехфазному трансформатору. Сигнальные электролампы на другом конце линии подключали по схеме «звезда».

Нулевые провода и экраны кабелей, металлические части кабельной конструкции и печи, источник напряжения и измерительный комплекс заземлили [9, 10].

Измерения температуры в печи и на образце проводили с интервалом не более 1 мин. Показания термопар выводили на дисплей компьютера.

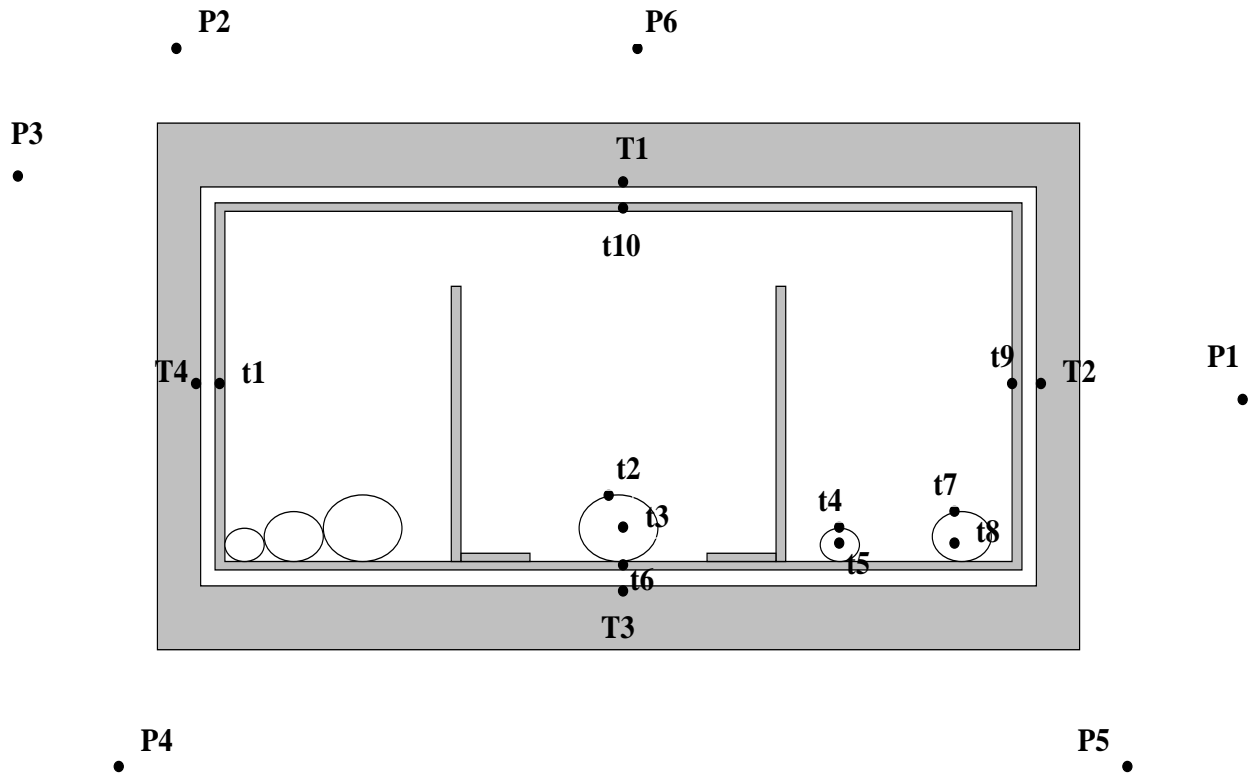


Рисунок 2 – Расположение точек термометрирования на кабелях, металлическом коробе, огнезащитном покрытии и в пространстве огневой печи

Результаты измерения температур во времени на силовых и контрольных кабелях для короба без огнезащиты приведены на рисунке 3. Температуру измеряли на поверхности и в центре поперечного сечения кабеля. Испытание прекратили на 23 минуте в момент потери функционирования всех кабелей, находившихся в коробе. На рисунке 4 приведены зависимости изменения температуры от времени на силовых и контрольных кабелях для короба с огнезащитными плитами PYRO-SAFE (СВТ «Браншутц») толщиной 40 мм. В процессе эксперимента имел место сбой в работе термодпары t_2 , установленной на поверхности кабеля. На 84-й минуте произошел срыв верхней крышки короба, обусловленный температурными напряжениями. На графике ясно виден скачок температур, соответствующий этому моменту времени.

В процессе испытаний вели наблюдение за сигнальными лампами и предохранителями. В зависимости от того, какое событие произойдет раньше, фиксировали момент времени, в который происходило отключение лампочки в сети кабельной линии или перегорал предохранитель при обрыве жил кабелей или коротком замыкании жилы на корпус короба. Испытания продолжали до момента выхода из строя всех кабелей. После окончания испытаний изоляция всех кабелей внутри короба выгорела полностью. На рисунке 5 приведена фотография финального состояния кабельной линии.

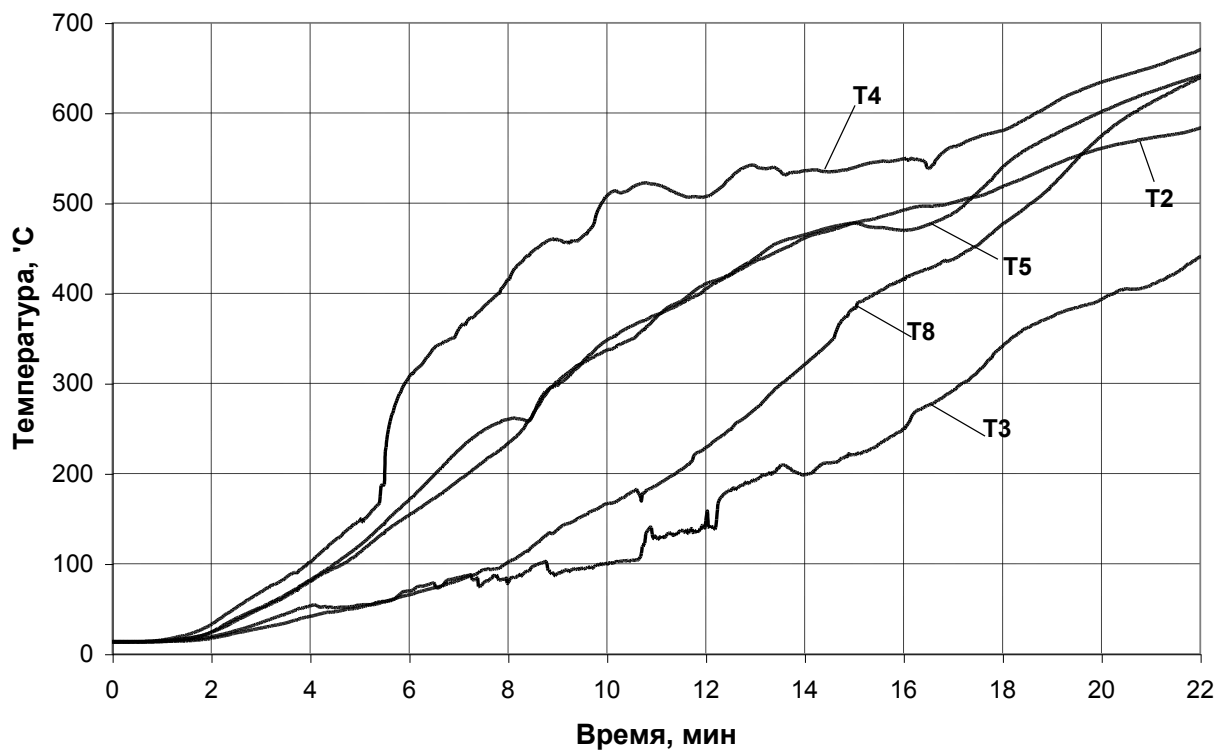


Рисунок 3 – Зависимость температуры от времени в точках термометрирования в коробе без огнезащитного покрытия

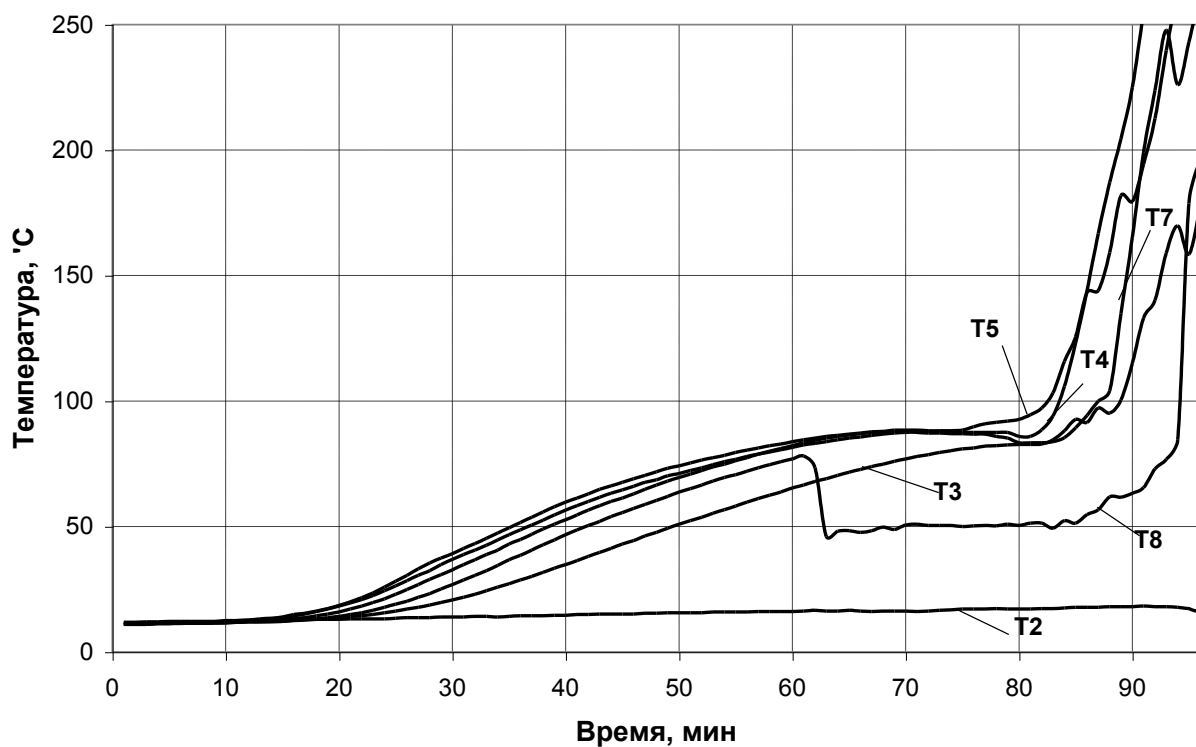


Рисунок 4 – Зависимость температуры от времени в точках термометрирования в коробе с огнезащитным покрытием из гипсовых плит



Рисунок 5 – Фотографія системи «короб – кабель» без огнезащитного покриття после испытания (крышка короба снята)

Таблица 1 – Предел огнестойкости и предельные температуры функционирования кабелей в коробе без огнезащитного покрытия

Тип кабеля	Предел огнестойкости, мин	Предельная температура функционирования, °С
Контрольный КпоБВнг 7×2,5	12,0	420
Контрольный КПоЭВнг 14×2,5	15,2	400
Силовой ПвБВнг 3×50 + 1×25	22,3	450

Таблица 2 – Предел огнестойкости и предельные температуры функционирования кабелей в коробе без огнезащитного покрытия

Тип кабеля	Предел огнестойкости, мин	Предельная температура функционирования, °С
Контрольный КпоБВнг 7×2,5	94,0	260
Контрольный КПоЭВнг 14×2,5	95,4	220
Силовой ПвБВнг 3×50 + 1×25	97,2	190

В результате натурных испытаний найденные значения предела огнестойкости испытуемых кабельных линий, выполненных на основе короба типа ККБ-ЗПО-0,4/0,15 с кабелями КпоБВнг 7×2,5, КпоЭВнг 14×2,5 и ПвБВнг 3×50 + 1×25, которые используются в гермозоне реакторов АЭС типа ВВЭР-1000, составляют: для случая незащищенной кабельной линии – 12 мин (предельная температура функционирования на кабеле – 400°С); для кабельной линии с гипсовым огнезащитным покрытием – 94 мин (предельная температура функционирования на кабеле – 190°С) (таблицы 1, 2). Различие в значениях температур потери функционирования кабелей, по-видимому, связано с различием в темпе нагрева самих кабелей и их электрической изоляции.

Рассмотрим предел огнестойкости кабельной линии, как время от начала воздействия пожара до момента потери своих функциональных характеристик любого из электрических кабелей, расположенных в коробе. Основываясь на анализе полученных экспериментальных результатов (таблицы 1, 2) можно сделать важный вывод о том, что огнестойкость отдельного кабеля и связанная с этим огнестойкость всей кабельной линии сильно зависит от темпа нагрева рассматриваемого кабеля в линии. Темп нагрева отдельного кабеля (°С/с)

определялся как тангенс угла наклона температурной кривой нагрева этого кабеля (рисунок 6):

$$\kappa = \operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{b}.$$

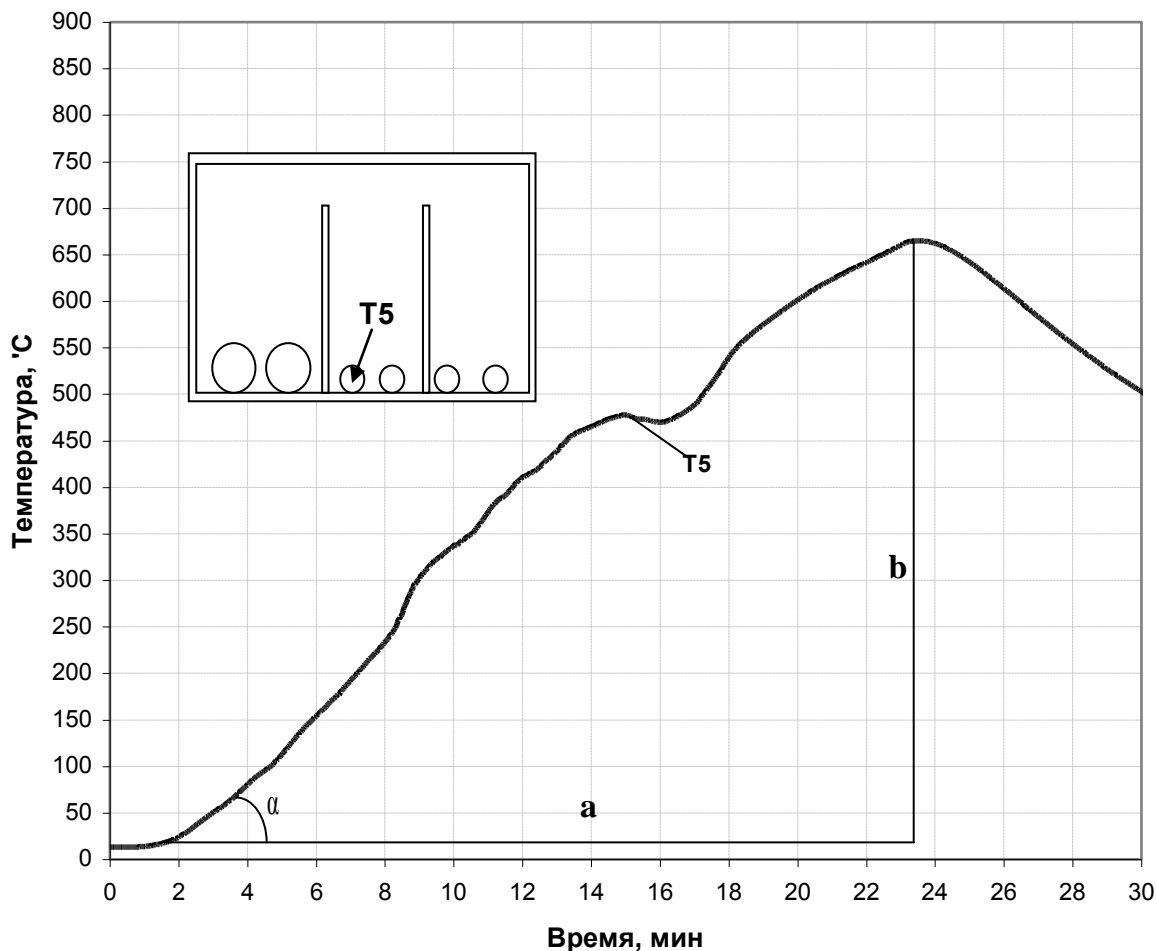
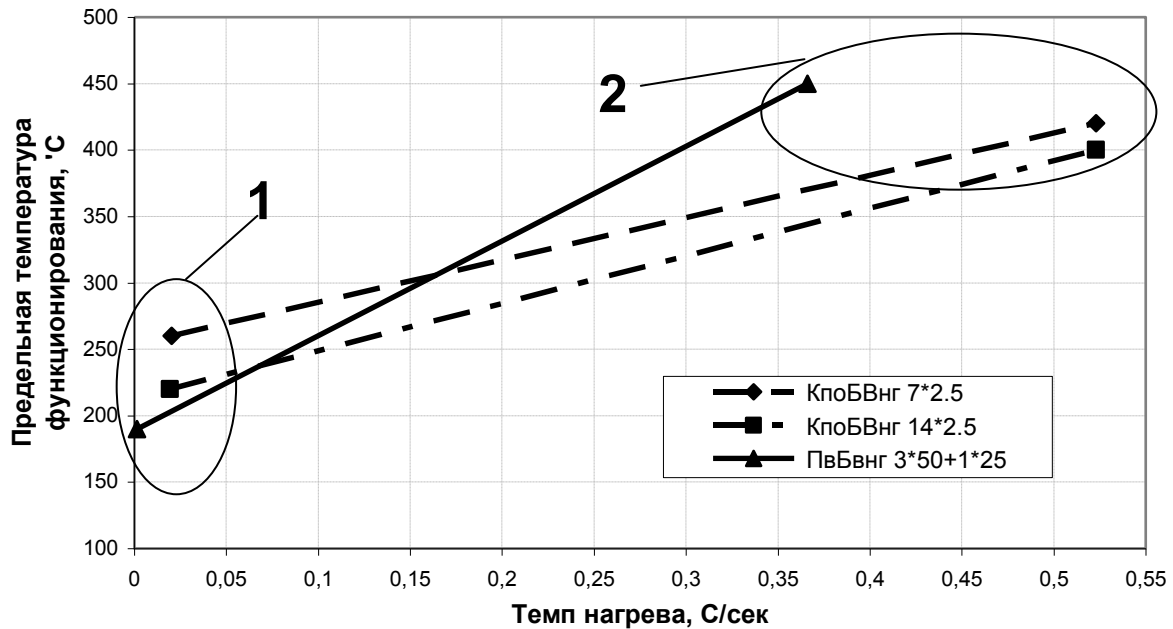


Рисунок 6 – Графічне визначення темпа нагріву по експериментальній температурній кривій, отриманій для контрольного кабелю КпоБВнг 7x2,5 (короб без огнезащити)

Используя полученные экспериментальные данные для термометрируемых кабелей был вычислен их темп нагрива. На рисунке 7 сведены все результаты таблиц 1, 2 по предельным температурам функционирования кабелей в коробе с- и без огнезащитного покрытия для трех типов электрических кабелей, применяемых в испытаниях на определение огнестойкости кабельной линии, в зависимости от темпа нагрива. Экспериментальные точки аппроксимировались прямыми линиями.

Анализ этих зависимостей показывает, что, например, для контрольного кабелю КпоБВнг 7x2,5 для вариантов с внешним огнезащитным покрытием ($\kappa = 0,0203$ К/с) и без него ($\kappa = 0,523$ К/с) можно отметить, что в кабельной линии с огнезащитным покрытием предельная температура функционирования существенно меньше, чем в кабельной линии без огнезащитного покрытия.



1 – лінія з огнезащитой;
2 – лінія без огнезащиты.

Рисунок 7 – Залежність граничної температури функціонування від темпа нагріву для електричних кабелів

Аналіз залежностей на рисунку 7 показує, що гранична температура функціонування електричних кабелів кабельної лінії залежить від темпа нагріву, – *чим більше темп нагріву, тим більше гранична температура функціонування кабелю*. Так темп нагріву електричних кабелів при застосуванні гіпсового огнезащитного покриття зменшується в більш ніж 20 раз, а гранична температура функціонування електричних кабелів при цьому зменшується приблизно в 2 рази. Нам представляється, що цей висновок дуже важливий з практичної точки зору і може бути використаний для аналізу огнестійкості кабельних ліній.

Проведений експериментальний аналіз кабельної лінії в умовах температурного режиму, близького до стандартної кривої пожеги, дозволив отримати наступні основні результати:

1. Вперше проведені випробування типових для реакторних блоків АЕС України кабельних ліній (короб типу ККБ-ЗПО-0,4/0,15) в огневих печах при дотриманні умов стандартного пожеги. Знайдені межі огнестійкості кабельних трас, як без огнезащитного покриття, так і з ним (22 хвилини і 94 хвилини відповідно). Визначена гранична температура функціонування для всіх електричних кабелів, рівна 190°С в разі випробування лінії з огнезащитним покриттям.

2. Отримані залежності температури від часу для різних точок термометрування кабельної лінії, що дозволить використовувати ці дані для подальшого розрахунково-експериментального визначення оптимальної товщини огнезащитного покриття з використанням різних матеріалів.

3. Визначено вплив темпа нагріву на граничну температуру електричних кабелів, що входять до складу кабельної лінії, – з збільшенням темпа нагріву збільшується гранична температура (приблизно в 2 рази). Темп нагріву електричних кабелів при застосуванні гіпсового огнезащитного покриття, зменшується більш ніж в 20 раз. Знайдена

закономерность, может помочь в прогнозировании предельных температур функционирования кабелей при режимах нагрева кабельной линии, отличных от стандартного режима пожара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПНАЭГ 9-027–91. Правила проектирования систем аварийного электроснабжения атомных станций.
2. US Patent No 4 436 868 Radflex.
3. Fire Protection Products 3M Ceramic Materials Department, Reports, (НПК Аскенн, Черкассы, Украина).
4. Baulicher Brandschutz im Industriebau Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer DIN V 18-230–87.
5. ТУ 16-705-432. Контрольные кабели.
6. ТУ 16-705-431. Силовые кабели.
7. ДСТУ Б В.1.1-4–98. Строительные конструкции. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования.
8. ДСТУ Б В.1.1-11–2005. Электрические кабельные линии. Метод испытаний на огнестойкость.
9. ПУЭ–76. Правила устройства электроустановок, СНИП III-33–76.
10. СН 102–76. Инструкции по устройству сетей заземления в электроустановках.

