

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОЖИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

### Введение

В настоящее время в Украине остро стоит проблема противопожарной защиты кабельных трасс, расположенных в гермозоне энергетических реакторов АЭС. Одна из задач - это определение приемлемых технических решений по обеспечению огнестойкости кабельных трасс. На сегодняшний день для решения такого рода задач применяется расчетно-экспериментальный подход [1]. Суть данного подхода заключается в совместном использовании экспериментальных и расчетных данных, обеспечения их корреляции и дальнейшем использовании компьютерной модели для нахождения оптимального решения.

При описании сложных геометрических областей с отличающимися теплофизическими свойствами даже в рамках современных высокоэффективных вычислительных программ возникают трудности, связанные с ограничениями на количество конечных элементов и время счета задачи, напрямую зависящее от производительности компьютера. Также нужно учитывать временные затраты на построение сложной, в геометрическом смысле, модели и построение конечно-элементной сетки для численного решения.

В настоящей работе изложен метод, позволяющий упростить создание сложных по геометрической структуре математических моделей силовых и контрольных кабелей, тем самым оптимизировать математическую модель кабельной трассы.

В гермозоне энергоблока АЭС в одном защитном металлическом корпусе может находиться 100 и более электрических кабелей, при степени заполненности корпуса кабелями 80% и более. Поскольку структура контрольных кабелей достаточно сложна (несколько слоев изоляции и большое количество отдельных жил - 7, 14 и более (рис.1)) возможным способом упрощения является замена каждого такого кабеля более простым по геометрической структуре. При этом кабель должен иметь такие геометрические и теплофизические характеристики, которые обеспечили бы идентичность его теплового состояния состоянию реального кабеля.

Соблюдение условий эквивалентности дает возможность выбора такой феноменологической модели теплового режима тепловой системы и определения таких коэффициентов этой математической модели, которые позволили бы получить результат - решение с заданной точностью и с

минимальными затратами времени.

Методологические принципы построения упрощенных математических моделей тепловых процессов, как линеаризация, гомогенизация, уменьшение мерности задачи, переход от криволинейных систем координат к прямоугольным, переход от сложной формы тел к простой, канонической и т.д., основаны на применении принципа эквивалентности.

**Принцип эквивалентности** формулируется как совокупность условий, которым должны отвечать решения, полученные из различных по форме и сложности математических моделей [2]. Для проведения структурной и параметрической идентификации исследуемого теплового режима тепловой системы, нужно сформулировать условия эквивалентности. В нашем конкретном случае - это одинаковые температуры в центре кабеля и на его периферии при идентичных условиях однозначности.

**Постановка задачи и описание объекта исследований**

В настоящем исследовании предлагается конкретное геометрическое упрощение модели электрического семижильного кабеля КПоБОВнг (7x1,5) без применения эффектив-

ных теплофизических характеристик. То есть, теплофизические характеристики отдельных материалов кабеля остаются теми же, однако расположение областей с определенными свойствами упрощается. В эквивалентной модели кабеля структуру и геометрию верхних слоев (изоляционная и защитная оплетка кабеля) сохраняем той же, а область с множеством жил и их изоляцией заменим concentрическими кольцами, площадь которых равна суммарной площади, занимаемой соответствующим материалом в исходной модели кабеля (см. рис. 1).

Для верификации предложенной эквивалентной модели решалась серия тестовых задач. Критерием правильности выбора эквивалентной модели принято равенство температур с заданной точностью в реперных точках реальной и эквивалентной моделей (в центре и на поверхности кабеля).

**Детальная и эквивалентная модели электрического кабеля**

Решалась задача радиационно-конвективного и кондуктивного теплообмена. Тепловое состояние описывается уравнением нелинейной нестационарной теплопроводности [3].

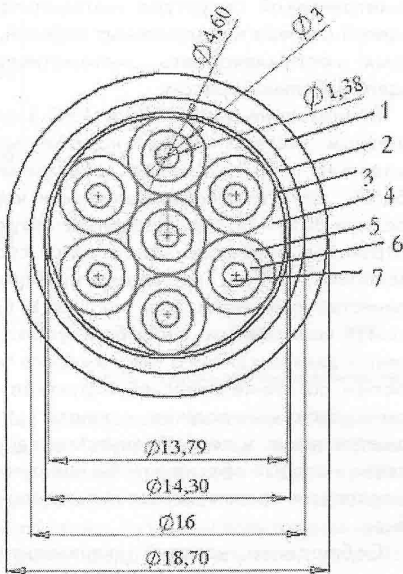


Рис.1 а) Реальная геометрия кабеля КПоБОВнг:

- 1- полихлорвинил; 2- полиэтилен;
- 3-сталь; 4- воздух; 5- полихлорвинил;
- 6- полихлорвинил; 7- медь.

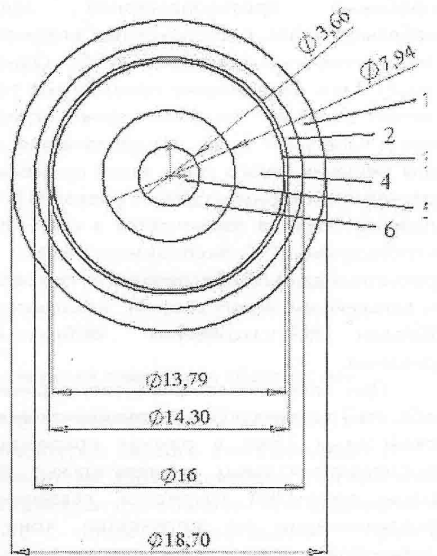


Рис.1 б) Параметры эквивалентной модели кабеля КПоБОВнг:

- 1 - полихлорвинил; 2 - полиэтилен;
- 3 - сталь; 4 - полихлорвинил; 5 - медь;
- 6 - воздух.

Таблица 1

## Теплофизические свойства материалов

№	Материал	Плотность, $\rho$ кг/м <sup>3</sup>	Теплофизические характеристики	
			$\lambda$ , Вт/м К	$c$ , Дж/(кг К)
1	Медь	8800	350	440
2	Сталь (Ст3КП1)	7800	30	400
3	Воздух (нормальные условия)	1,225	0.0242	1006,43
4	Полихлорвинил	500	0,3	500

\*Свойства материалов взяты из [4], [5].

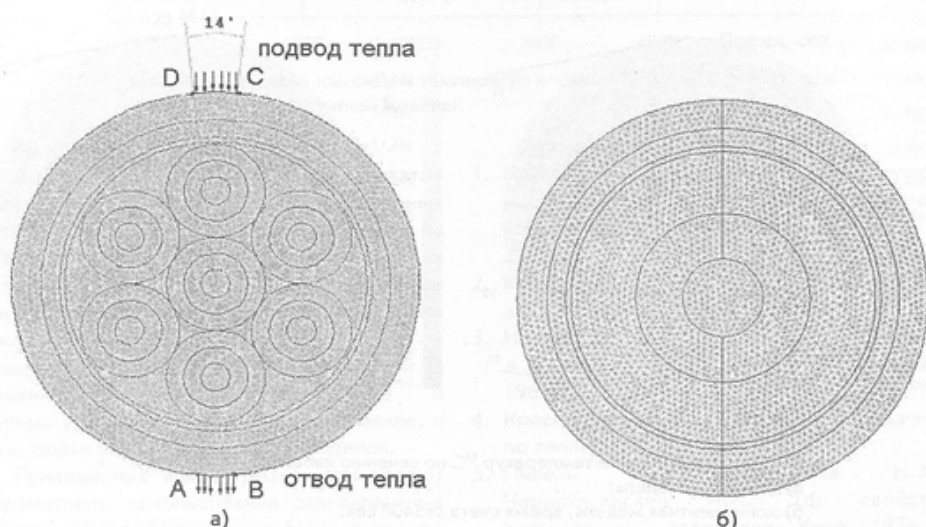


Рис.2 Конечноэлементные сетки:

- а) детальная модель кабеля КПоБОВнг 7х1,5 (количество элементов 7033, количество узлов 4685);  
 б) эквивалентная модель кабеля КПоБОВнг 7х1,5 (количество элементов 6832, количество узлов 4131).

Условия однозначности задачи для детальной и эквивалентной моделей:

- стационарная двумерная постановка задачи;

- на нижней границе А - В граничные условия первого рода ( $T_0 = 27^\circ\text{C}$ );

- на верхней границе D - C граничные условия третьего рода ( $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ,  $T_{\text{окр.ср.}} = 127^\circ\text{C}$  (см. рис. 2));

- на границах В - С и D - А теплообмен отсутствует.

Подвод и отвод тепла осуществлялся с поверхности кабеля, как показано на рис.2 (конечноэлементная сетка детальной и эквивалентной моделей контрольного кабеля с 7 жилами). Теплофизические свойства

материалов приведены в таблице 1.

В результате решения стационарной задачи получено распределение температур по сечению кабеля для случаев детальной и эквивалентной моделей (рис.3). Отличие температур в соответствующих точках двух моделей составило не более  $\pm 1^\circ\text{C}$  при максимальной температуре  $128^\circ\text{C}$ .

Более близка к реальности нестационарная постановка задачи, в которой тепловые потоки, подводимые к кабелю, значительно выше (температуры на кабеле в коробе без огнезащитного покрытия могут достигать  $1000^\circ\text{C}$ ). Предложенные ниже граничные условия для детальной и эквивалентной модели максимально

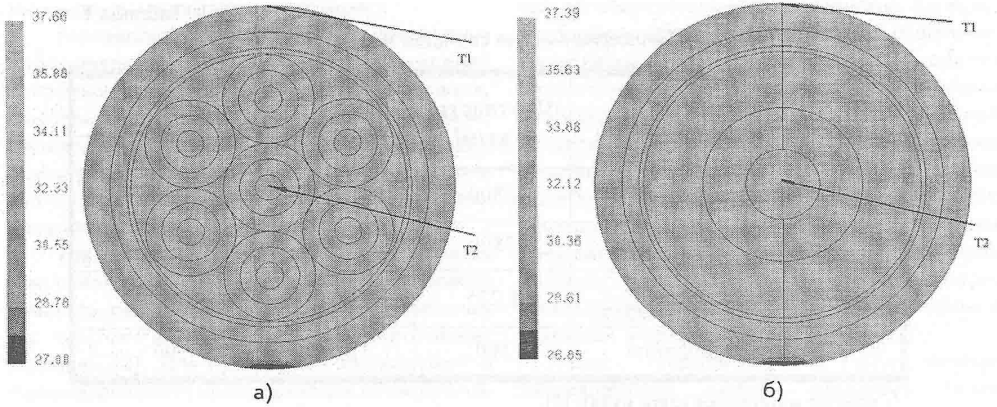


Рис.3 Распределения температур по сечению кабеля

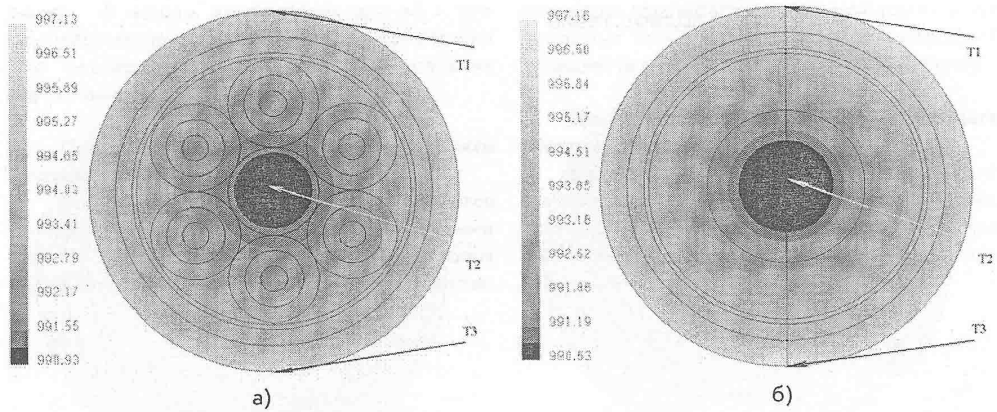


Рис. 4 Распределение температур °С по сечению кабеля:

а) детальная модель;

б) эквивалентная модель, время счета  $\tau=5400$  сек.

приближены, к тепловым нагрузкам, воздействующим на электрический кабель, расположенный в металлическом корпусе на который воздействует стандартный температурный режим пожара. Стандартным температурным режимом пожара является температурный режим в огневой испытательной печи, где испытывается объект на огнестойкость, соответствующий заранее известной (заданной, нормативной) зависимости температуры от времени.

На нижней границе А - В (см. рис.2) задавались условия третьего рода с коэффициентом теплоотдачи  $\alpha=60 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Изменение температуры окружающей среды задавали в соответствии с функцией стандартного пожара:

$$T = T_0 + T_1 \lg(A\tau + 1),$$

где  $T_1=345^\circ\text{К}$ ,

$T_0$  = температура окружающей среды;

$A=0,133 \text{ сек}^{-1}$ .

Подвод тепла также моделировался граничными условиями третьего рода на всей верхней границе В - А (см. рис.2), где  $\alpha = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , а изменение температуры окружающей среды задавали в соответствии с функцией стандартного пожара.

Результаты расчета распределений температур по сечению кабеля в нестационарной задаче приведены на рис.4.

На рис.5 приведены графики изменения температур в точках T1, T2 и T3 для детальной и эквивалентной моделей.

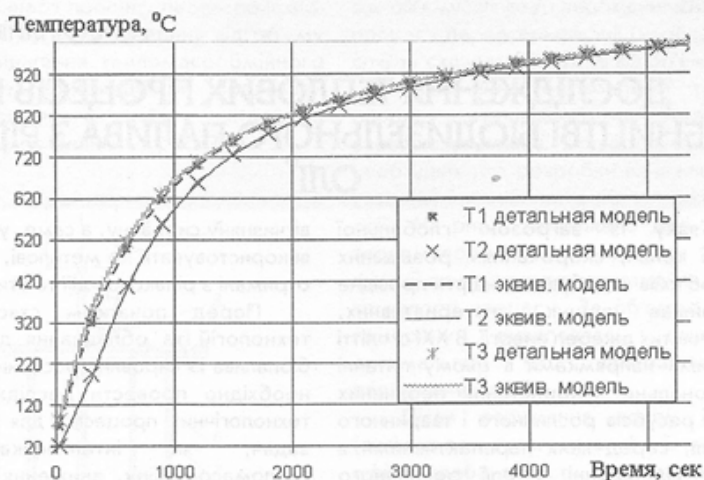


Рис.5. График изменения температур в точках T1, T2 и T3 (рис.4) для детальной и эквивалентной моделей

### Выводы

Анализ приведенных выше результатов показывает, что температуры в заданных точках T1, T2 и T3 отличаются менее чем на 1.0% как для стационарной, так и для нестационарной задач. Такое незначительное отличие значений температур в исследуемых точках можно объяснить тем, что в эквивалентной модели слой металла (слой 3) выравнивает температурное поле и температура на центральной медной жиле, в итоге, почти одинакова для двух моделей.

Приведенные выше результаты делают правомерным использование эквивалентных моделей кабеля для расчета кабельных трасс в условиях пожарных нагрузок. Данный подход в создании компьютерных моделей существенно сокращает затраты времени на построение геометрии исследуемого объекта, а также позволяет использовать более грубую конечноэлементную сетку, за счет которой сокращается время счета задачи. Этот метод также можно применить для моделирования других конструкций, сходных по геометрическому строению с электрическим кабелем.

### Литература

1. Круковский П.Г. Обратные задачи тепло - массопереноса (общий инженерный подход). К.: ИТФ НАН Украины, 1998. - 224с.
2. Коздоба Л.А. Вычислительная теплофизика. К.: Наук. Думка, 1992. - 224с.
3. Исаченко В.М., Осипова В.А., Сухомел А.С. Теплопередача. -М.; Энергоиздат, 1981.
4. Краснощеков Е.А., Сухомел А.С. Задачник по теплопередаче. -М.; 1975.
5. Пивень А.Н., Гречаная Н.А., Чернобыльский И.И. Тф свойства полимерных материалов. Киев, 1976. - 180с.