

## О ВЫПОЛНЕНИИ СВЯЗИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ИЗБЫТОЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР В АКТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

В.А. Касьянов, В.С. Логинов, В.Е. Юхнов

На раннем этапе разработки опытного образца электромагнита (Э) возникает проблема о распределении удельных электрических потерь или функции тепловыделения в конкретном активном элементе. Знание распределения источников тепловыделения позволит решить ряд практических задач. Во-первых, уточнить методику электромагнитного расчета Э. Во-вторых, провести его тепловой расчет. В-третьих, выбрать минимальное число охлаждающих каналов или перераспределить источники тепловыделения, зависящие от координат и времени для обеспечения допустимого нестационарного режима малогабаритного Э.

Восстановление функции тепловыделения по опытной информации распределения температур относится к классу решения обратных задач теплообмена. Методы решения таких задач [1] - [4] дают возможность провести исследования сложных нелинейных нестационарных задач тепло - и массопереноса в условиях приближенных к натурным, или непосредственно при эксплуатации технических систем. Это, в свою очередь, создает предпосылки к обоснованному выбору проектно-конструкторских и технологических решений.

В [6] было показано, что нестационарное температурное поле внутри тела конечных размеров можно рассчитать по приближенной зависимости

$$\theta(X, Y, Fo) = \frac{t(x, y, \tau) - t_{жс}}{t_0 - t_{жс}} = \frac{\theta(X^*, Y, Fo) \cdot \theta(X, Y^*, Fo)}{\theta(X^*, Y^*, Fo)}, \quad (1)$$

где  $t(x, y, \tau) - t_{жс}$  - превышение температуры тела над температурой окружающей среды;  $\theta(X^*, Y, Fo), \theta(X, Y^*, Fo)$  - безразмерные превышения температур на поверхности тела;  $\theta(X^*, Y^*, Fo)$  - безразмерная температура в углу прямоугольника;  $X=x/R_x, Y=y/R_y$  - безразмерные координаты;  $R_x, R_y$  - геометрические размеры;  $Fo$  - число Фурье.

Таким образом, температурное поле внутри тела, включая значения максимальных температур, может быть рассчитано, ес-

ли известны температуры на его поверхностях. Их можно измерить непосредственно без нарушения электрической изоляции.

В [7] на основе анализа опытных данных и известных решений задач теплопроводности, электромагнитного поля в воздушном зазоре электромагнитов показано, что связь (1) выполняется не всегда с заданной точностью, а только при строго определенном сочетании тепловых, геометрических и других параметров.

В [8] сформулирована и доказана теорема о необходимых и достаточных условиях, при которых строго выполняется связь (1). Надежные результаты по расчету теплового состояния активного элемента в нестационарных условиях можно получить только тогда, когда будет иметь место минимальная невязка в уравнении энергии. В противном случае можно получить неверные результаты расчетов.

Были проведены расчеты по выяснению влияния точности исходных данных и определения собственных чисел на конечные результаты расчетов. Установлено, что наибольшая погрешность расчетов наблюдается для случая при отсутствии охлаждения нажимной плиты турбогенератора (табл.).

Поэтому при больших числах Фурье можно ограничиться сравнительно небольшой невязкой в  $10^{-4}$  при определении собственных чисел, поскольку точная величина  $\theta=14,40$  мало отличается от приближенного ее значения 14,42. Что касается выполнения граничных условий, то по этому поводу можно сказать следующее. Если при расчете была достигнута минимальная невязка в уравнении энергии, то граничные условия выполняются с достаточно высокой точностью. В данных примерах невязки в граничных условиях имели порядок от  $2 \cdot 10^{-5}$  до  $1 \cdot 10^{-4}$  в зависимости от точности определения собственных чисел краевой задачи.

$Fo=0,1, R=7,5, Po_0=112, X^*=0,5, Y^*=0,5R, N=s=2,0, M=0, D=-1,7778 \cdot 10^{-2}, Bi_i=0,00001 (i=1,2,3,4)$ . Этим числам Био соответствуют следующие собственные числа ( $\mu_n=\gamma_m R$ ): 0,0001, 3,142, 6,283, 9,425, 12,566,  $k=p=5$ ;  $B=\exp[-(\mu_n^2+\gamma_m^2+s)Fo]$ .

Таблица - Оценка исходных данных на результаты расчета

№	$Bi_i$	$\zeta$	$\theta$	n; m	$\mu_1 = \gamma_1 R$	B
1	0,00001	-41,1	5,87	2;3		0,347
2	0,0001	-29,65	5,59	4;2		$1,4 \cdot 10^{-4}$
3	0,0001	-32,81	5,61	5;5		$1 \cdot 10^{-7}$
4	0,0001	+93,7	-7,32	4;5	0,0001	$1 \cdot 10^{-4}$
5	0,001	-5,86	3,101	4;5	0,0001	$1 \cdot 10^{-4}$
6	0,001	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$-3 \cdot 10^{-5}$	4;5	0,001	$1 \cdot 10^{-4}$
		$-4 \cdot 10^{-3}$	380,2	5;5	0,00001	$1 \cdot 10^{-7}$
		-4,86	3,09	3;4	0,0001	$1,6 \cdot 10^{-2}$
7 <sup>)</sup>	0,001	-5,87	3,10	4;5	0,001	$1,4 \cdot 10^{-4}$
		-7,61	3,11	5;5	0,001	$1 \cdot 10^{-7}$
8 <sup>**)</sup>		0,06	11,20	3;3		$1 \cdot 10^{-2}$
		-3,31	8,31	4;5		$1 \cdot 10^{-4}$

Примечание: <sup>)</sup> – постоянное тепловыделение при  $D=s=N=M=0$ , <sup>\*\*)</sup> – при тепловыделении  $Po_0=112$ ,  $D=-1,7778 \cdot 10^{-2}$ .

### ВЫВОДЫ

1. При проектировании активных элементов энергетического оборудования рекомендуется проведение анализа погрешностей расчёта температурного поля с учётом изменения картины тепловыделения в процессе эксплуатации.

2. Целесообразно при разработке численных или приближенных методов расчёта нестационарных температурных полей в активных элементах наряду с сопоставлением опытных данных по конкретной энергетической машине приводить данные по невязке уравнения энергии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов А.Н. Об устойчивости обратных задач // ДАН СССР, 1943. Том 39, №25, С.195-198.  
 2. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. – М.: Машиностроение, 1988. –280 с.

3. Бакушинский А.Б. К распространению принципа невязки // ЖВМ и МФ, 1970, Том.10, №1. – С. 210-214.

4. Трушинский В.Н. О регуляризирующих свойствах нелинейных итеративных методов и их применение в некоторых обратных задачах // ИФЖ, 1985, Том. 49, №6. – С. 954-958.

5. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Наука, Физматлит, 1997. –320 с.

6. Бойков Г.П. Закон связи между избыточными температурами тел конечных размеров // Инженерно-физический журнал. 1962. Том 5, №3. - С. 107 – 109.

7. Логинов В.С., Милютин Г.В., Чистякова Г.П. Экспресс – анализ картины полей по информации на границе активного элемента ускорителя и реактора // Инженерно-физический журнал. 1989. Том 56, № 1. – С.138.

8. Логинов В.С. Условия выполнения связи нестационарных избыточных температур активного элемента // Известия РАН. Энергетика. 2002, № 1. - С. 43-52.