

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Т.М. Халина, А.И. Тищенко, А.Б. Дорош

Расчет тепловой проводимости энергоэффективных композиционных электрообогревателей для систем поверхностно-распределенного обогрева на объектах АПК.

Ключевые слова: тепловая проводимость, многоэлектродный, композиционный, электрообогреватель, энергоэффективные системы обогрева.

Одним из энергоэффективных способов обогрева является поверхностно-распределенный электрообогрев, который может быть реализован с помощью композиционных электрообогревателей (КЭ). КЭ представляют собой сложную систему, преобразующую электрическую энергию в тепловую в соответствии с электро-, теплофизическими параметрами.

Обеспечение заданных эксплуатационных характеристик КЭ, особенно в условиях влажных и агрессивных сред сельскохозяйственных помещений, требует определения аналитической зависимости теплофизических параметров от конструктивно-технологических.

Решение задачи может быть выполнено методом непосредственного определения напряженности электростатического поля [1] с учетом математической аналогии потенциальных полей (электростатического, электрического, магнитного, теплового) в сочетании с методом конформных преобразований. Расчетная модель КЭ состоит из длинной пластины, размещенной в прямоугольном изолирующем материале, и тела с плоской поверхностью. При ее выборе были приняты следующие граничные условия: поверхность между объектом теплоотвода и изоляционным покрытием – изотермическая, поверхность между изоляционным покрытием и воздухом – непроницаемая (адиабатная) для линий потока тепла. В следствие того, что изоляционное покрытие однородно, а толщина резистивного и изоляционного слоев намного меньше длины и ширины электрообогревателя, тепловое поле приближенно можно считать плоскопараллельным.

Учитывая вышеперечисленные положения и исходя из условий эксплуатации КЭ, при расчетах теплового состояния конвективным теплообменом можно пренебречь; при радиационном теплообмене законы Рэлея-

Джинса и Вина характеризуют излучение в предельных случаях, а для больших и малых значений аргумента λT длина волны теплового излучения λ находится в пределах $0,1 \div 1000$ мкм, что не характерно для рассматриваемых систем; в соответствии с законом Стефана - Больцмана, с учетом того, что температура рабочей поверхности электрообогревателя не превышает 350 К, доля теплового излучения от общего теплового потока составляет несколько процентов; поэтому теплоперенос в рассматриваемых системах принимается кондуктивным [2].

В результате введения плоскопараллельной расчетной модели и конформного отображения исходной плоскости комплексного переменного Z на плоскость нового комплексного переменного ζ с соблюдением необходимых соответствий точек исходной и отображенной плоскостей были получены системы нелинейных трансцендентных уравнений. Решение систем выполнялось численно с помощью модификации дискретного метода Ньютона. Определенные интегралы, входящие в функции системы уравнений, вычислялись на каждой итерации путем использования квадратурной формулы Ньютона-Котеса восьмого порядка. С применением данного метода для наиболее часто встречающихся систем КЭ выполнен:

- расчет тепловой проводимости с учетом толщины изоляционного покрытия;
- расчет тепловой проводимости с учетом смещения электродов;
- распределения температуры по поверхности.

Расчетные модели и системы в отображенной плоскости приведены в табл.1.

Параметры отображения, точные и приближенные расчетные формулы приведены в таблице 2.

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Введенные плоскопараллельные расчетные модели наряду с качественной оценкой функционирования КЭ позволили получить количественные результаты.

Таблица 1 - Расчетные модели композиционных электрообогревателей и системы в отображенной плоскости

№. п.п.	Расчетная модель	Система в отображенной плоскости
1		
2		
3		

Таблица 2 - Формулы для определения параметров конформного отображения и безразмерных теплопроводностей для систем, приведенных в таблице 1

№.п.п.	Параметры отображения	Точные и приближенные расчетные выражения
1	$\frac{l}{h} = \frac{I_4}{I_1 + I_3}, \quad \frac{2h}{H} = \frac{I_1 + I_3}{I_1 + I_3 + I_5},$ $\frac{L}{H} = \frac{I_6}{I_1 + I_3 + I_5},$ $I_1 + I_3 = \int_0^{a_1} \sqrt{\frac{(a_1^2 - \xi^2)}{(a_2^2 - \xi^2)(a_3^2 - \xi^2)(a_4^2 - \xi^2)}} d\xi,$ $I_4 = \int_{a_1}^{a_2} \sqrt{\frac{(\xi^2 - a_1^2)}{(a_2^2 - \xi^2)(a_3^2 - \xi^2)(a_4^2 - \xi^2)}} d\xi,$ $I_5 = \int_{a_2}^{a_3} \sqrt{\frac{(\xi^2 - a_1^2)}{(\xi^2 - a_2^2)(a_3^2 - \xi^2)(a_4^2 - \xi^2)}} d\xi;$ $I_6 = \int_{a_3}^{a_4} \sqrt{\frac{(\xi^2 - a_1^2)}{(\xi^2 - a_2^2)(\xi^2 - a_3^2)(a_4^2 - \xi^2)}} d\xi.$ <p>$I_1 \div I_6$ - гиперэллиптические интегралы, определенные численно в соответствии с [3]</p>	$\frac{G_{Tl}}{\lambda} = 2 \frac{K(k')}{K(k)},$ <p>где λ- коэффициент теплопроводности, $K(k)$ и $K(k')$ – полные эллиптические интегралы первого рода с модулями</p> $k = \sqrt{\frac{(1 - \frac{a_2}{a_3})(1 + \frac{a_2 a_3}{a_3 a_4})}{(1 + \frac{a_2}{a_3})(1 - \frac{a_2 a_3}{a_3 a_4})}}; \quad k' = \sqrt{1 - k^2}.$ $\frac{G_{Tl}}{\lambda} \Big _{h=0}^{L=\infty} = \frac{4l}{H} + \frac{8}{\pi} \ln 2,$ $\frac{G_{Tl}}{\lambda} \Big _{h=0} \approx \frac{4}{\pi} \ln \frac{4}{k} \approx \frac{4l}{H} + \frac{8}{\pi} \ln 2 - 4e^{-\frac{\pi(L-2l)}{2H}} =$ $= \frac{G_{Tl}}{\lambda} \Big _{h=0}^{L=\infty} (1 - g), \quad g = \frac{4e^{-\frac{\pi(L-2l)}{2H}}}{\frac{4l}{H} + \frac{8}{\pi} \ln 2}.$
2	$\frac{l}{h} = \frac{I_2}{I_1}, \quad \frac{2l}{H} = \frac{2I_2}{2I_1 + I_3 + I_4}$ $\frac{2\Delta h}{H} = \frac{I_4 - I_3}{2I_1 + I_3 + I_4}; \quad I_1 = I_6; \quad I_2 = I_5,$ <p>где</p> $I_1 = \int_0^{a_1} \sqrt{\frac{(a_1 - \xi)(a_6 + \xi)}{(a_2 - \xi)(a_3 - \xi)(a_4 + \xi)(a_5 + \xi)}} d\xi;$ $I_2 = \int_{a_1}^{a_2} \sqrt{\frac{(\xi - a_1)(a_6 + \xi)}{(a_2 - \xi)(a_3 - \xi)(a_4 + \xi)(a_5 + \xi)}} d\xi;$ $I_3 = \int_{a_2}^{a_3} \sqrt{\frac{(\xi - a_1)(a_6 + \xi)}{(\xi - a_2)(a_3 - \xi)(a_4 + \xi)(a_5 + \xi)}} d\xi;$ $I_4 = \int_{a_3}^{a_4} \sqrt{\frac{(a_1 + \xi)(\xi - a_6)}{(a_2 + \xi)(a_3 + \xi)(a_4 - \xi)(\xi - a_5)}} d\xi;$ $I_5 = \int_{a_4}^{a_5} \sqrt{\frac{(a_1 + \xi)(\xi - a_6)}{(a_2 + \xi)(a_3 + \xi)(a_4 - \xi)(a_5 - \xi)}} d\xi;$ $I_6 = \int_0^{a_6} \sqrt{\frac{(a_1 + \xi)(a_6 - \xi)}{(a_2 + \xi)(a_3 + \xi)(a_4 - \xi)(a_5 - \xi)}} d\xi.$ <p>$I_1 \div I_6$ - гиперэллиптические интегралы, определенные численно в соответствии с [4]</p>	$\frac{G_{Tl}}{\lambda} = 2 \frac{K(k')}{K(k)},$ <p>где $K(k)$ и $K(k')$ – полные эллиптические интегралы с модулями:</p> $k = \sqrt{\frac{1 - a_2/a_3}{1 + a_5/a_3}} \quad \text{и} \quad k' = \sqrt{1 - k^2}.$

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

3	$\frac{l}{h} = \frac{I_4}{I_1 + I_3}, \quad \frac{2h}{H} = \frac{I_1 + I_3}{I_1 + I_3 + I_5},$ $\frac{L}{H} = \frac{I_6}{I_1 + I_3 + I_5},$ $I_1 + I_3 = \int_0^{a_1} \sqrt{\frac{(a_1^2 - \xi^2)}{(a_2^2 - \xi^2)(a_3^2 - \xi^2)(a_4^2 - \xi^2)}} d\xi,$ $I_4 = \int_{a_1}^{a_2} \sqrt{\frac{(\xi^2 - a_1^2)}{(a_2^2 - \xi^2)(a_3^2 - \xi^2)(a_4^2 - \xi^2)}} d\xi,$ $I_5 = \int_{a_2}^{a_3} \sqrt{\frac{(\xi^2 - a_1^2)}{(\xi^2 - a_2^2)(a_3^2 - \xi^2)(a_4^2 - \xi^2)}} d\xi;$ $I_6 = \int_{a_3}^{a_4} \sqrt{\frac{(\xi^2 - a_1^2)}{(\xi^2 - a_2^2)(\xi^2 - a_3^2)(a_4^2 - \xi^2)}} d\xi.$ <p>$I_1 \div I_6$ - гиперэллиптические интегралы, определенные численно в соответствии с [5]</p>	$\Delta T = \int_{a_k}^{a_{k+1}} h_{\eta=0}(\xi) d\xi = A \int_{a_2}^{a_3} \frac{d\xi}{\sqrt{(\xi^2 - a_2^2) \xi - a_3 \xi - a_4 }} \text{ гд}$ <p>е a_k, a'_k - координаты краев k-го тела (пластины); A - постоянная; n - число электродов.</p> $A = \frac{\Delta T}{I},$ <p>где $I = \int_{a_2}^{a_3} \frac{d\xi}{\sqrt{(\xi^2 - a_2^2)(a_3 - \xi)(a_4 - \xi)}}$.</p>
----------	---	---

Анализ полученных массивов значений тепловой проводимости позволяет подобрать такие конструктивные размеры электрообогревателей, при которых относительные разности температур по поверхности были бы минимальны. Приведенные данные позволяют проектировать электрообогреватели с заданной температурой на его рабочей поверхности при обеспечении минимального ее отклонения.

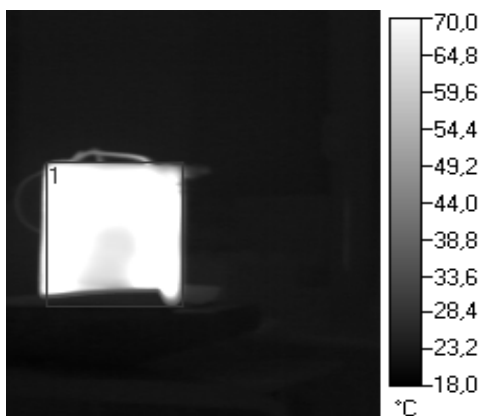


Рисунок 1 - Температурное поле КЭ, размером 300x250x12 мм, через 60 мин. после включения

Для экспериментального подтверждения полученных результатов были проведены исследования с помощью тепловизора ТН 5104 IR MAN, которые позволили получить ряд

снимков температурных полей КЭ. Установлено, что КЭ выходят на рабочий режим и тепловой баланс устанавливается в зависимости от их типоразмеров за время 30-60 мин., среднее отклонение температуры на рабочей поверхности не превышает 12% (рисунок 1). Равномерность распределения температур подтверждается 3D профилем (рисунок 2).

Полученные аналитические зависимости тепловой проводимости КЭ в зависимости от конструктивных параметров, массивы точных и приближенных значений тепловых проводимостей КЭ для различных сочетаний геометрических размеров являются теоретической основой для разработки инженерной методики расчета.

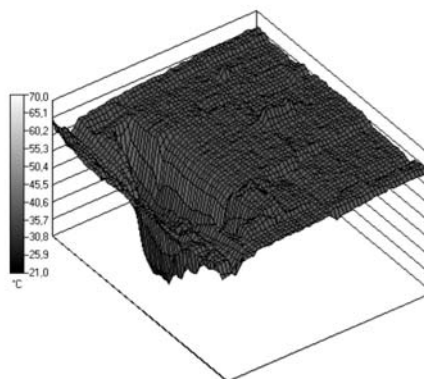


Рисунок 2 – 3D профиль температурного поля КЭ

ХАЛИНА Т.М., ТИЩЕНКО А.И., ДОРОШ А.Б.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иоссель, Ю.Я. Расчет электрической емкости. / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский.- Л.: Энергоатомиздат, 1981. - 288 с.
2. Евстигнеев, В.В. Расчет и проектирование низкотемпературных композиционных электрообогревателей/ В.В. Евстигнеев, Г.А.Пугачев, Т.М. Халина, М.В. Халин СО РАН, Новосибирск: Наука, 2001-168с.
- 3 Евстигнеев, В.В. Расчет тепловой проводимости между длинной пластиной, размещенной в прямоугольном теплоизоляторе, и телом с плоской поверхностью /В.В. Евстигнеев, Т.М. Халина / Сб.тр. СО АИН РФ.-Барнаул: Из-во АлтГТУ, 2000.- Вып.1.
- 4 Халина, Т.М. Многоэлектродные системы низкотемпературных композиционных электрообогревателей для агропромышленного комплекса: дис... докт. техн. наук / Т.М. Халина. - Барнаул, 2005. - 445 с.
5. Халина, Т.М. Расчет распределения температуры по поверхности НТКЭ для предприятий-АПК. Известия ТПУ, 2004- т.307, № 7

Халина Т.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Общая электротехника» АлтГТУ им. И.И. Ползунова;

Тищенко А.И., д.т.н., профессор, помощник ректора АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: tischenko2004@inbox.ru;

Дорош А.Б., инженер кафедры «Общая электротехника» АлтГТУ им. И.И. Ползунова.