

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ КАТУШЕК НАМАГНИЧИВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА

А. А. Митюнин, аспирант

В. И. Чарыков, доктор технических наук, профессор

А. И. Яковлев, аспирант

Курганская государственная сельскохозяйственная
академия им. Т. С. Мальцева

E-mail: Alek-AM@mail.ru

Ключевые слова: катушки намагничивания, температура нагрева, программный комплекс, температурное поле, изотермы теплового поля, электромагнитный сепаратор, постоянная нагрева

Реферат. *Степень нагрева катушки электромагнитного сепаратора определяет срок службы изоляционных материалов, входящих в конструкцию, и, следовательно, срок службы всей катушки, а зачастую и всего устройства в целом. Поэтому была поставлена задача рассчитать стационарное температурное поле в осесимметричной катушке намагничивания, имеющей форму полого цилиндра, и проверить соответствие температуры катушки требованиям нормативной документации. Особенностью тепловых расчетов является то, что катушки рассчитывались с помощью программного комплекса ELCUT и производилось сравнение с опытными данными, полученными во время испытания катушек. Анализ стационарного температурного поля выполняли, прибегая к упрощенной модели. Упрощение основывалось на нескольких допущениях. Реальный сепаратор, состоящий из разнородных частей с разными теплотехническими свойствами, считался однородным телом с бесконечно большой теплопроводностью. Последнее свойство означает, что температура во всех точках рассматриваемого тела всегда одинакова. Температура окружающей среды за время нагрева постоянная. Теплоемкость катушки намагничивания не зависит от температуры окружающей среды.*

Электромагнитные сепараторы предназначены для разделения сыпучих материалов по магнитным свойствам. Источником тепла в электромагнитных сепараторах являются катушки, питаемые постоянным током. С поверхности катушки тепло передается окружающей среде с помощью основных способов теплообмена: теплопроводности, излучения и конвекции. Учет этих видов теплоотдачи требует анализа множества факторов, влияющих на эти явления. Особенности укладки проводников при намотке и наличие изоляции проводников обуславливают неоднородность тела катушки (металл проводника, изоляционный покров проводника, промежутки между ними). В связи с этим возникают трудности расчета перепада температуры в толще катушки.

Цель исследований – рассчитать стационарное температурное поле в осесимметричной катушке намагничивания и проверить соответствие температуры катушки требованиям стандартов.

Задачи исследований:

1. Произвести замеры температуры нагрева катушек намагничивания электромагнитного сепаратора.

2. Рассчитать температуру нагрева катушек намагничивания в программном комплексе ELCUT.

3. Сравнить экспериментальные данные с теоретическими расчетами программы ELCUT.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследования – катушки намагничивания электромагнитного сепаратора просыпного типа.

Теоретический расчет теплового режима работы электромагнитных сепараторов связан с большими трудностями, которые усугубляются тем, что величина коэффициента теплоотдачи зависит от большого количества разнообразных факторов и для электромагнитных сепараторов достаточно точных значений нет. Поэтому теоретический расчет для практических целей малопригоден, а его результаты недостаточно надежны.

Сложность и ненадежность теоретического расчета явились причинами, обусловившими проведение экспериментального исследования теплового режима работы катушек электромагнитного

сепаратора. По результатам этого исследования необходимо было получить такие экспериментальные данные, которые позволили бы в дальнейшем с достаточной для практики точностью (без вычислений и предварительных экспериментов) определять температуру нагрева катушек сепаратора.

В инженерных расчетах значительного количества вариантов конструкций сепараторов требуется проведение тепловых расчетов. Поэтому в сепараторостроении применяют различные способы и программы для расчета тепловых режимов и других параметров, связанных с нагревом катушек. Одна из таких программ – ELCUT, мощный современный комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов [1].

Эксперименты проводились на электромагнитном сепараторе (рис. 1), представляющем собой П-образный сердечник из наборного железа 3 с двумя катушками намагничивания 2. К концам сердечника прикреплены полюсные наконечники 4 для создания неоднородного магнитного поля, которые закрыты неметаллическим листом 5, во избежание попадания частиц на полюсные наконечники и для удобства очистки от них внизу расположен продуктопровод 1, который крепится к полюсным наконечникам с помощью четырех болтов. Сепарируемый материал идет по наклонному продуктопроводу самотёком, ферромагнитные частицы притягиваются к полюсным наконечникам. Сам сепаратор располагается под углом α к горизонту [2].

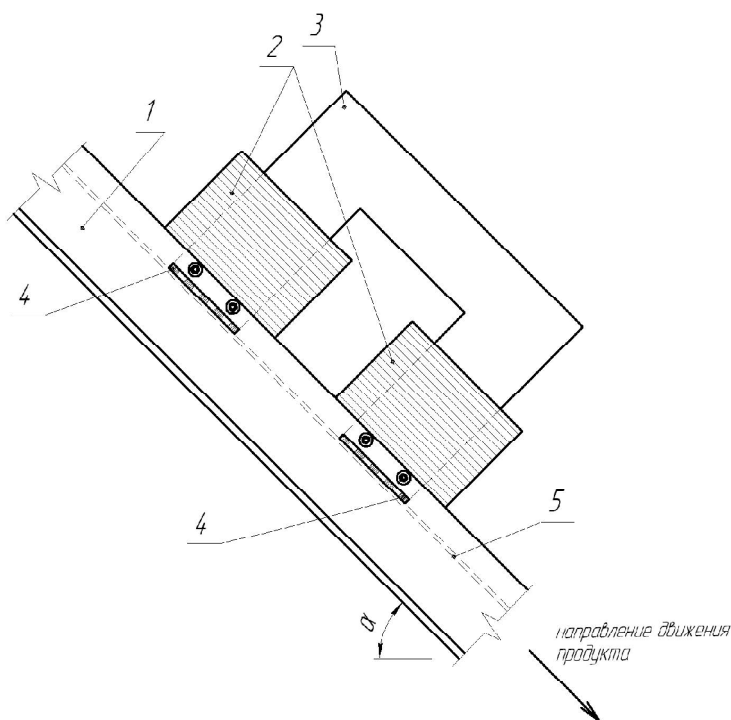


Рис. 1. Электромагнитный сепаратор

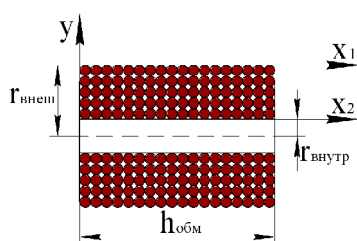


Рис. 2. Геометрические характеристики катушки намагничивания:

$r_{\text{внутр}}$ – внутренний радиус сердечника катушки намагничивания; $r_{\text{внеш}}$ – расстояние от центральной оси сердечника до края обмотки катушки намагничивания; $h_{\text{обм}}$ – высота катушки намагничивания

Объектом исследования послужили осесимметричные катушки намагничивания (рис. 2), при этом была поставлена задача рассчитать стационарное температурное поле и проверить соответствие температуры катушки требованиям нормативной документации.

Очень простым и удобным методом для приближенного определения температуры нагрева обмоток, валков, подшипников и других частей сепаратора в промышленных условиях является метод термометрирования. Согласно ГОСТ 183–55, термин «термометр» включает термометры расширения (ртутные, спиртовые), незаложенные

термопары и незаложенные термометры сопротивления. Чаще всего при определении температуры пользуются обычными ртутными термометрами, предел измерения для которых составляет 0–200 °С. Термометры помещают в заранее намеченные точки замеров. При этом для уменьшения теплоотдачи в окружающую среду шарик термометра окутывают ватой или другим теплоизолирующим материалом [3].

Следует заметить, что в тех случаях, когда в электромагнитных сепараторах используются поля переменного тока, применение ртутных термометров для тепловых испытаний не рекомендуется,

поскольку они в этих условиях могут дать значительную погрешность.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для наших экспериментов по измерению температуры мы применяли термопару цифрового мультиметра MAS 838. Термопару размещали в заранее намеченные точки и крепили с помощью изоляционной ленты. Интервалы замеров составляли 15 мин (таблица).

Экспериментальные данные теплового режима катушки намагничивания

№ п/п	Время t , ч	Последовательное соединение катушек	
		T_k , °С	$\Delta t = T_k - T_{\text{окр. ср.}}$, °С
1	0	20	0
2	0,25	29	9
3	0,5	26	16
4	0,75	41	21
5	1	46	26
6	1,25	50	30
7	1,5	53	33
8	1,75	55	35
9	2	57	37
10	2,25	58	38
11	2,5	60	40
12	2,75	61	41
13	3	62	42
14	3,25	63	43
15	3,5	64	44
16	3,75	64	44
17	4	64	44

Расчет в программе ELCUT выполняли при последовательном соединении катушек намагничивания и напряжении 220 В.

Для расчета были заданы следующие параметры. Размеры катушки (см. рис. 2): $h_{\text{обм}} = 140$ мм; $r_{\text{внеш}} = 100$ мм; $r_{\text{внутр}} = 60$ мм; сопротивление катушки намагничивания при температуре 20 °С: $R_{20} = 101$ Ом; температурный коэффициент сопротивления (для меди): $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$.

Объем обмотки

$$V_{\text{обм}} = \pi \cdot h_{\text{обм}} \cdot (r_{\text{внеш}}^2 - r_{\text{внутр}}^2). \quad (1)$$

Сопротивление катушки намагничивания при расчетной температуре

$$R_B = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 20)], \quad (2)$$

где t_p – расчетная температура, °С.

Напряжение питания одной катушки намагничивания:

$$U = \frac{U_{\text{выпр}}}{n}, \quad (3)$$

где $U_{\text{выпр}}$ – выпрямленное напряжение питания катушек намагничивания;

n – количество катушек намагничивания.

Мощность тепловыделения в одной катушке намагничивания:

$$P = \frac{U^2}{R_T}. \quad (4)$$

Объемная мощность тепловыделения в одной катушке намагничивания:

$$P_{\text{об}} = \frac{P}{V_{\text{обм}}}. \quad (5)$$

При расчете по вышеприведенным формулам получены следующие данные:

Напряжение питания катушки намагничивания U , В	220
Выпрямленное напряжение U , В	198
$V_{обм}$, см ³	3963
t_p , °С	32
R_p , Ом	104,8
U , В	101
P , Вт	97,34
$P_{об}$ Вт/см ³	0,025

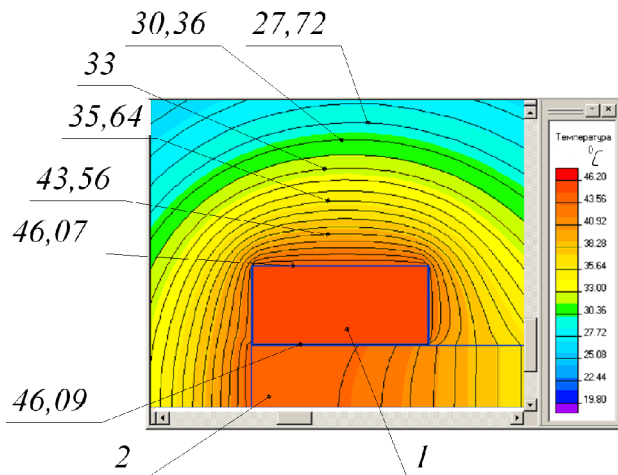


Рис. 3. Изотермы стационарного теплового поля при последовательном соединении катушек намагничивания при напряжении 220 В и суммарном сопротивлении 202 Ом:

1 – катушка намагничивания; 2 – сердечник

На картине теплового поля (рис. 3) показано распределение температуры нагрева обмоточного провода. Выделяющаяся в обмоточном проводе теплота передается на активные элементы электромагнитного сепаратора и в окружающую среду.

На графиках распределения температуры (рис. 4, 5) показано, как меняется температура на внешней и внутренней поверхности катушки намагничивания при продолжительном режиме работы, когда температура достигает установившегося значения, и сепаратор при этой температуре остается под нагрузкой длительное время. Самая нагреваемая часть обмотки располагается по центру высоты катушки намагничивания ($h_{обм}$). По мере удаления от центра к краям катушки температура уменьшается. Изменение температуры по радиусу (рис. 6) показывает изменение температуры в направлении от внутренней поверхности катушки намагничивания к внешней [4].

На рис. 7 приведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими данными нагрева, построенными в программном комплексе ELCUT. По полученным графикам видно, что максимальная температура внутри катушки намагничивания достигает 46,09°С. Расчеты показывают, что температура не превышает допустимую, которую может выдержать изоляция при классе нагревостойкости E и допустимой температуре нагрева катушки $Q_{нагр} = 80 \dots 85$ °С [5].

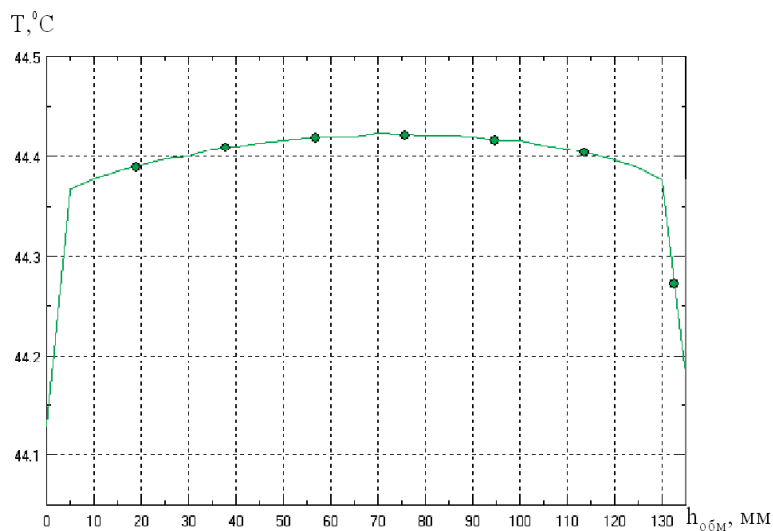


Рис. 4. Распределение температуры на внешней поверхности обмотки вдоль оси x_1 (см. рис. 2)

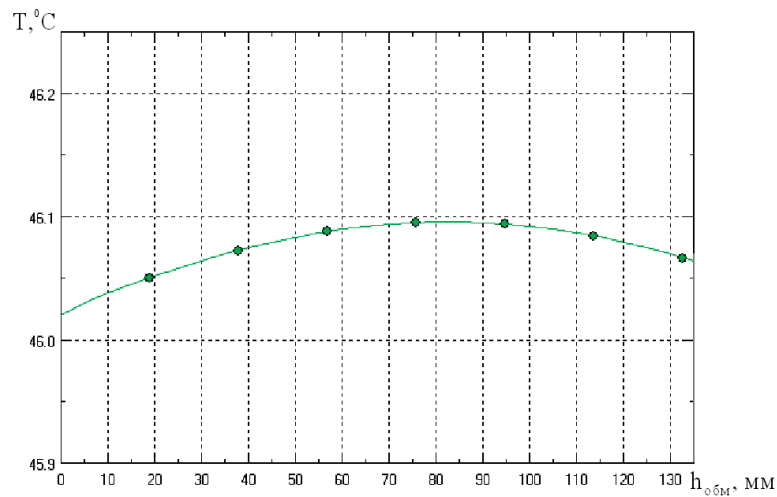


Рис. 5. Распределение температуры на внутренней поверхности обмотки вдоль оси x_2 (см. рис. 2)

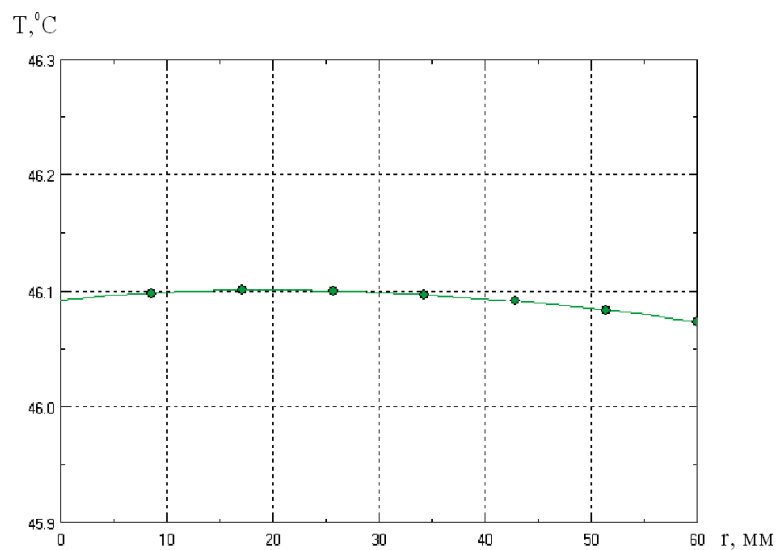


Рис. 6. Распределение температуры по радиусу по центру катушки намагничивания

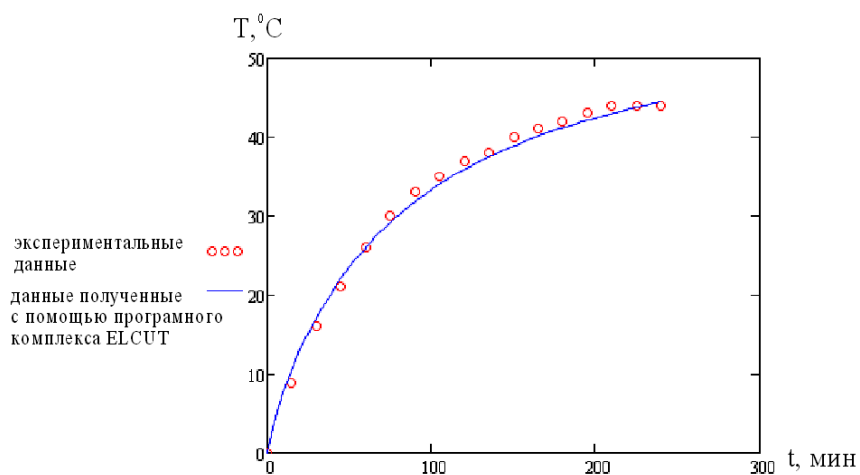


Рис. 7. Сравнение экспериментальных данных и данных, полученных с помощью программного комплекса ELCUT

ВЫВОДЫ

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Произведены замеры температуры нагрева катушек намагничивания электромагнитного сепаратора с помощью метода термометрии и составлена таблица экспериментальных исследований. 2. Рассчитана температура нагрева катушек намагничивания в программном комплексе ELCUT и составлены графики распределения | <ol style="list-style-type: none"> 3. Выполнено сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами программы ELCUT. Исходя из проведенных экспериментов и расчетов, полученных в программном комплексе, был сделан вывод, что температура не превышает допустимую температуру нагрева, которую может выдержать изоляция при классе нагревостойкости Е. |
|--|--|

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Руководство пользователя ELCUT: моделирование двумерных полей методом конечных элементов.* – СПб.: ПК TOP, 1989–2007. – С. 31.
2. Митюнин А.А., Чарыков В.И. Очистка семян масличных культур с помощью электромагнитного сепаратора // Материалы ЛII Междунар. науч.-практ. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – 2013. – Ч. 5. – С. 257–262.
3. Ямпилев С.С., Цыбенев Ж.Б. Технологии и технические средства для очистки зерна с использованием сил гравитации. – Улан-Удэ: ВСГТУ, 2006. – 167 с.
4. Расчет мощности тепловыделения катушки намагничивания электромагнитного сепаратора /В.И. Чарыков, А.А. Евдокимов, А.А. Митюнин, С.А. Соколов // Вестн. Курган. ГСХА. – 2012. – № 2 (2). – С. 67–70.
5. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока. – М.: Энергия, 1968. – С. 107; 41–42.

THERMAL CALCULATION FOR MAGNETIZATION COILS OF ELECTROMAGNETIC SEPARATOR

A.A. Mitunin, V.I. Charykov, A.I. Yakovlev

Key words: magnetization coils, heating temperature, program complex, temperature field, isotherms of thermal field, electromagnetic separator

Summary. The degree of electromagnetic separator coil heating determines the service life of isolation fabrics of the construction and consequently, the service life of the whole coil, more often, the entire device. Therefore the objective was set to calculate stationary temperature field in the axisymmetric magnetization coil, that had the shape of a hollow cylinder, and to check with the correspondence between coil temperature and regulatory documents. The characteristic of thermal calculations is that coils were calculated with the software complex ELCUT and compared with the experimental data obtained during the coils testing. The analysis of the stationary temperature field was done with a simplified model. The simplification was based on several assumptions. An actual separator, which was composed of heterogenous parts with different thermal and technical properties, was referred to as a homogenous body possessing infinitely great thermal conductivity. The latter property means that the temperature in all the points of the body examined has been always the same. The temperature of the environment is constant during heating. The magnetization coil thermal capacity does not depend on the temperature of the environment.