

УДК 621.791.75

Размышляев А. Д., Агеева М. В.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОВ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКЦИИ УПРАВЛЯЮЩЕГО ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

Использование поперечного магнитного поля (ПОМП) при автоматической электродуговой сварке и наплавке под флюсом позволяет управлять гидродинамикой жидкого металла в ванне, геометрией шва (валика), повысить коэффициент расплавления электрода и измельчить структуру шва (наплавленного металла) [1–4].

В настоящее время нет простых методик для расчета компонент индукции в зоне сварочной ванны, которые генерируют устройства ввода (УВ) ПОМП. Известные расчетные методики, пригодные для этих целей [5–7], характеризуются чрезмерной сложностью. В работе [9] приведена методика получения численных значений поперечной компоненты индукции под электродом и продольной компоненты индукции под стержнями УВ ПОМП. Однако, в этой работе нет данных о распределении указанных компонент индукции поля в зоне между стержнями УВ ПОМП. В работе [8] предложена расчетная методика, позволяющая получить данные о таком распределении. Однако эта расчетная методика требует значительного объема вычислений. Необходима разработка упрощенной расчетной методики определения распределения компонент индукции, генерируемой УВ ПОМП, которая не отличалась бы чрезмерной сложностью. Разработка такой расчетной методики значительно упростит задачу оптимизации проектируемого УВ ПОМП.

Целью настоящей работы является разработка упрощенной методики для определения характера распределения компонент индукции, генерируемых УВ ПОМП, в зоне головной части ванны, электродной капли и дуги применительно к дуговой сварке и наплавке.

Для реализации этой цели выполняли следующие исследования.

По литературным данным [6] между строением магнитного поля, генерируемого УВ ПОМП, имеется аналогия со строением электростатического поля, если бы последнее поле генерировалось аналогичными заряженными телами. Индукция (B) и напряженность электростатического поля (E), генерируемые соответственно электромагнитами и заряженными телами, в определенной точке окружающего пространства складываются как векторы. Математический аппарат для описания электростатического поля разработан более полно, чем для электромагнитного поля, поэтому в исследованиях поставлена задача по использованию возможности моделирования стационарного магнитного поля стационарным электростатическим полем.

Расчетное моделирование выполнялось применительно к конструкции УВ ПОМП из двух электромагнитов с сечением стержней $F_c = 26 \times 16$ мм из ферромагнитной стали с обмотками на каждом стержне. На рис. 1, а приведены основные параметры и размеры УВ ПОМП: a – расстояние между стержнями A и B у их нижних торцов; h – расстояние от торцов стержней до изделия; α – углы наклона стержней к вертикали. На рис. 1, б приведены размеры: b – ширина стержня; c – толщина стержня; L_c – длина стержня; L_k – высота обмотки; H – расстояние от торца стержня до обмотки.

Для упрощения расчетной методики в центре (по толщине c стержней УВ ПОМП) вырезали тонкий слой толщиной δ . Плоскость этого слоя проходит через ось электрода, т. е. через ось OX (рис. 1, а), и эта плоскость перпендикулярна направлению сварки. В пересечении этой плоскости с поверхностью изделия – пластиной в точке «0» (рис. 1, а) наблюдаются максимальные значения компоненты индукции B_x .

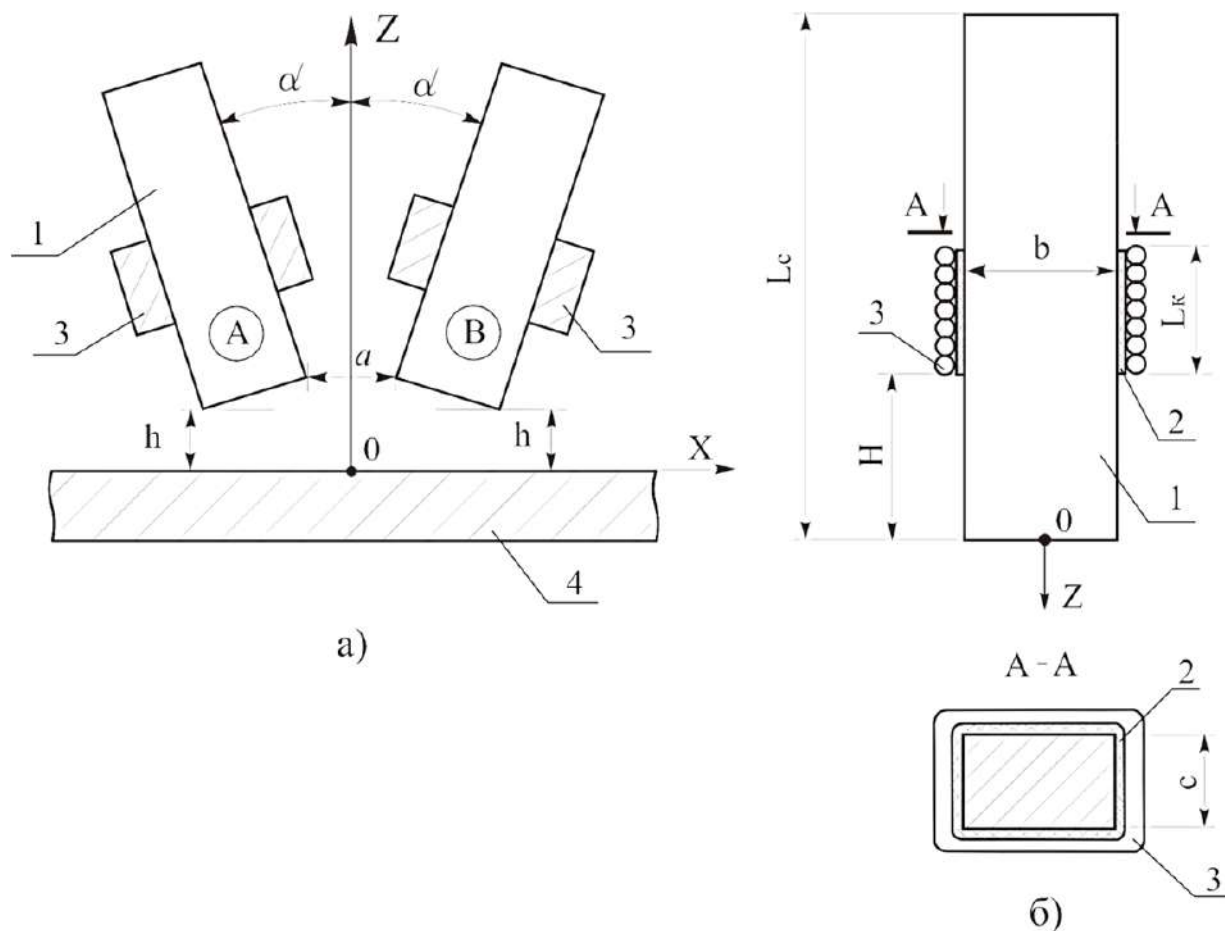


Рис. 1. Устройство ввода ПОМП с двумя стержнями (а) и конструкция стержня с обмоткой (б):

1 – стержень; 2 – изолятор; 3 – обмотка; 4 – изделие

Знания о величине индукции B_x ПОМП в этой точке важны, поскольку значения индукции B_x в этой точке определяют эффективность воздействия ПОМП на гидродинамику сварочной ванны, на поведение электродной капли и сварочной дуги. Стержни A и B разбивались на прямоугольные участки одинаковой площади. В качестве примера на рис. 2 показано, что стержни A и B разбивались на прямоугольные участки: на 5 слоев по высоте и на 4 слоя по ширине, т. е. на 20 прямоугольных участков с одинаковой площадью. В центре каждой площадки размещали заряд с линейной плотностью τ (принимали $\tau = 4$).

$$\tau = q/\delta, \tag{1}$$

где q – величина заряда в центре каждой площадки;
 δ – толщина модельного слоя, м (условно принимали $\delta = 1 \cdot 10^{-3}$ м).

При этом изделие – пластина не является ферромагнетиком.

Принято, что из центра каждой площадки на стержне A векторы E «исходят» и «входят» в центры каждой площадки стержня B . На рис. 2 показано суммирование векторов E в точке C от зарядов τ , расположенных в центре площадки 11 (стержень A) и площадке 11' (стержень B). Векторы E раскладываются в точке C на горизонтальную и вертикальную составляющие. Тогда для вектора, «исходящего» из стержня A :

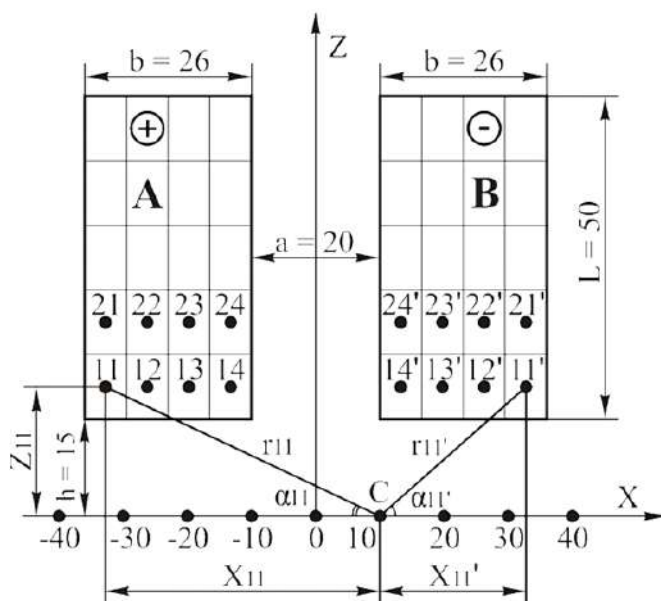
$$E_{xi} = E_i \cdot \cos \alpha_i = E_i \frac{x_i}{r_i}, \tag{2}$$

$$E_{zi} = E_i \cdot \sin \alpha_i = E_i \frac{z_i}{r_i}, \tag{3}$$

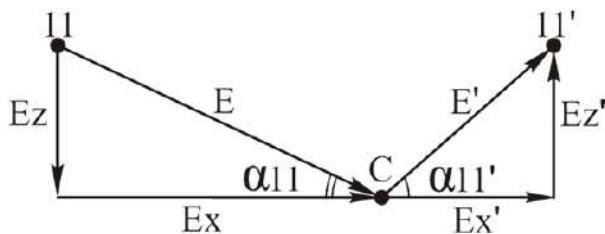
где x_i – расстояние от источника τ до рассматриваемой i -ой точки по оси OX , м;
 r_i – расстояние от источника τ до рассматриваемой i -ой точки, м;
 z_i – расстояние от источника τ до рассматриваемой i -ой точки по оси OZ , м.
 Для векторов, «входящих» в стержень B , аналогично:

$$E'_{xi} = E'_i \cdot \cos \alpha'_i = E'_i \frac{x'_i}{r'_i}, \tag{4}$$

$$E'_{zi} = E'_i \cdot \sin \alpha'_i = E'_i \frac{z'_i}{r'_i}. \tag{5}$$



а



б

Рис. 2. Схема к расчету электростатического поля при моделировании:
 а – общий вид; б – направления векторов
 В свою очередь:

$$E_i = \tau / r_i; \tag{6}$$

$$E_i' = \tau/r_i' ; \quad (7)$$

$$\tau = q/\delta , \quad (8)$$

где q – величина заряда в центре каждой площадки;

δ – толщина модельного слоя, м.

Для получения численных значений компонент векторов E_x и E_z в рассматриваемой точке C (рис. 2) выполняли суммирование компонент E_x и E_x' , E_z и E_z' от действия источников, расположенных в центрах всех элементарных площадок в стержнях A и B . Аналогично выполнялись расчеты для всех точек на оси OX , расположенных с шагом через 10 мм (рис. 2, а).

На рис. 3 приведена схема моделей стержней, для которых выполнялись расчеты. При исследовании были выдержаны постоянные значения: ширина стержня $b = 26$ мм, длина стержня $l = 50$ мм, расстояние от торцов стержней до оси OX – $h = 15$ мм и расстояние между нижними кромками стержней $a = 20$ мм. Нижние кромки стержней во всех случаях были параллельны горизонтальной оси OX . Изменялись только углы наклона стержней к вертикальной оси α : 0° , $22,5^\circ$, 45° и 90° (горизонтальное расположение стержней). При выполнении расчетов использовалась программа Mathcad 15.

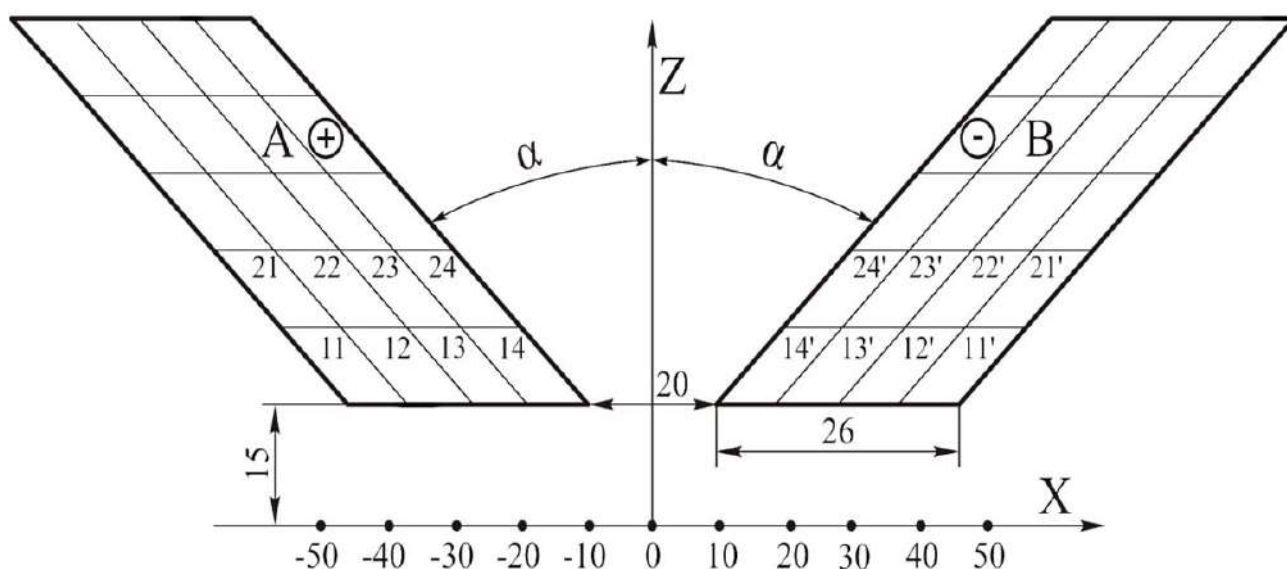


Рис. 3. Схема к расчету электростатического поля при варианте размещения стержней под углом наклона $\alpha = 45^\circ$

На рис. 4 приведены результаты расчетов для углов α наклона стержней: 0° , $22,5^\circ$, 45° и 90° в абсолютных значениях (в делениях). Эти данные позволяют количественно оценить оптимальный угол наклона стержней к вертикали для конструкции УВ ПОМП, схема которой приведена на рис. 3. Для достижения максимальных значений индукции B_x (аналога E_x) в зоне электродной капли и сварочной дуги (когда $X = 0$) оптимальным является угол α в пределах $0^\circ \dots 45^\circ$. Учитывая конструкции сварочных автоматов, вариант, когда угол $\alpha = 90^\circ$ (кривая 4 на рис. 4), трудно практически использовать в реальном процессе дуговой сварки под флюсом.

На рис. 5 приведены результаты расчетов по описанной выше методике (кривые 1 и 2), а также экспериментальные данные для системы из двух электромагнитов (относительные значения магнитной индукции B_x/B_{xmax} и B_z/B_{zmax} – кривые 3 и 4). Данные об индукции получены измерением их значений у поверхности изделия – пластины (рис. 1, а). В исследованиях

использовали электромагниты с сечением стержней из низкоуглеродистой стали $F_c = b \times \delta = 26 \times 16$ мм, длиной $L = 130$ мм с обмотками длиной $l = 30$ мм. Расстояние от обмоток до торца стержня $H = 50$ мм. По катушкам пропускали постоянный ток $I = 8$ А. Индукцию измеряли универсальным тесламетром 43205 с датчиком Холла, имеющим базу $0,9 \times 0,9$ мм.

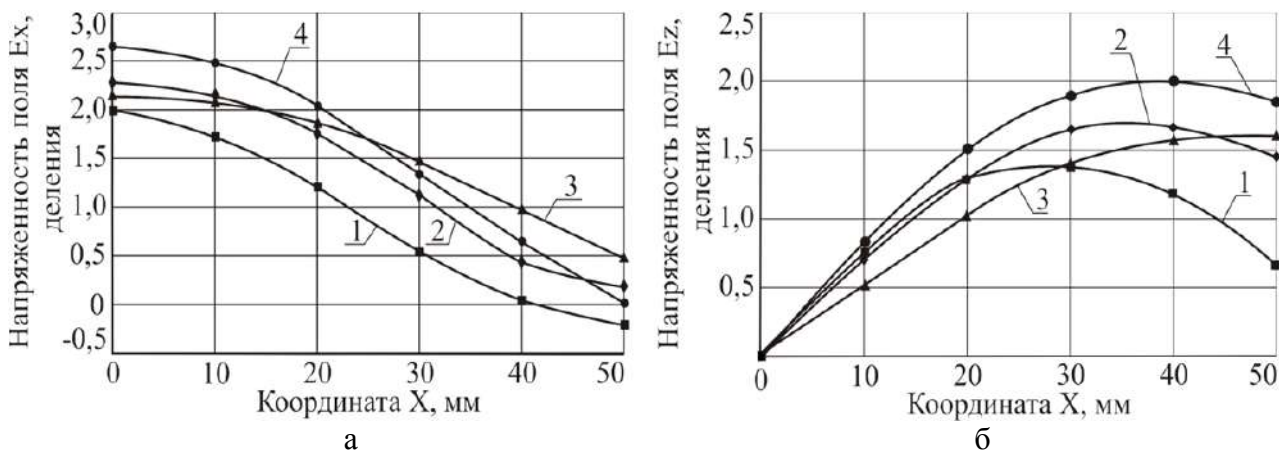


Рис. 4. Распределение компонент E_x (а) и E_z (б) вдоль оси OX ($a = 20$ мм):
 1 – E_x , $\alpha = 0^\circ$; 2 – E_x , $\alpha = 22,5^\circ$; 3 – E_x , $\alpha = 45^\circ$; 4 – E_x , $\alpha = 90^\circ$

Эти данные показывают, что расчетные значения E_x/E_{xmax} и экспериментальные значения B_x/B_{xmax} очень близки между собой для значений $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$. Аналогично и значения E_z/E_{zmax} и B_z/B_{zmax} близки между собой. Следует отметить, что для оценки характера распределенности напряженности поля E вдоль какого-либо направления (осей X, Y, Z) необходимо выражать в относительных единицах, например, через параметр E_x/E_{xmax} . В этом случае распределение компоненты поля электростатического E_x/E_{xmax} , будет совпадать с распределенностью компонент индукции поля магнитного, генерируемого реальной конструкцией УВ ПОМП (B_x/B_{xmax}).

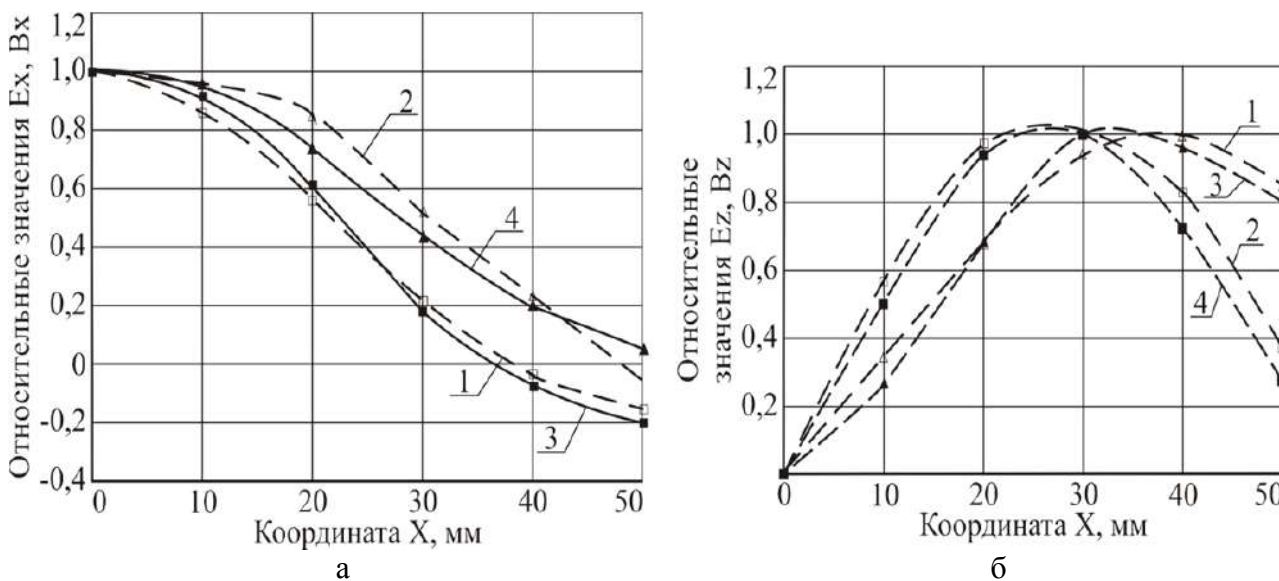


Рис. 5. Распределение относительных значений компонент E_x, B_x (а) и E_z, B_z (б) вдоль оси OX ($a = 20$ мм):
 а: 1 – E_x/E_{xmax} , $\alpha = 0^\circ$; 2 – E_x/E_{xmax} , $\alpha = 45^\circ$; 3 – B_x/B_{xmax} , $\alpha = 0^\circ$; 4 – B_x/B_{xmax} , $\alpha = 45^\circ$;
 б: 1 – E_z/E_{zmax} , $\alpha = 0^\circ$; 2 – E_z/E_{zmax} , $\alpha = 45^\circ$; 3 – B_z/B_{zmax} , $\alpha = 0^\circ$; 4 – B_z/B_{zmax} , $\alpha = 45^\circ$

Таким образом, предложенная расчетная методика адекватно описывает структуру магнитных полей, индуцируемых системой УВ ПОМП из двух электромагнитов, и ее можно использовать для оптимизации конструкции УВ ПОМП применительно к процессам дуговой сварки и наплавки.

Данные показали, что оптимальным является угол наклона стержней УВ ПОМП в пределах $0^0 \dots 45^0$. Торцы стержней УВ ПОМП должны быть параллельны поверхности свариваемой пластины (см. рис. 3). Соотношения размеров сечения стержней УВ ПОМП следует принять, исходя из конструктивных соображений, а также с учетом расчетов по изложенной методике, чтобы при равной намагничивающей силе обмоток получить максимум значений поперечной компоненты индукции B_x ПОМП в головной части сварочной ванны, в зоне электродной капли, либо варочной дуги.

Методика перехода от относительных значений компонент E_x/E_{xmax} , E_z/E_{zmax} к численным значениям индукций B_x , B_z приведена в работе [9], которой следует воспользоваться.

ВЫВОДЫ

Предложена расчетная методика с применением уравнений электростатики, которая адекватно отражает строение магнитных полей, генерируемых реальными УВ ПОМП, и позволяет оценивать распределение компонент индукции магнитного поля в головной части сварочной ванны.

Предложенный метод может быть использован для оптимизации конструкции УВ ПОМП, чтобы обеспечить максимальные значения поперечной компоненты индукции в головной части сварочной ванны при неизменной величине намагничивающей силы обмоток на стержнях этого УВ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скиперский Н. А. Формирование шва поперечным магнитным полем при сварке немагнитных материалов / Н. А. Скиперский, А. М. Рыбачук // Сварочное производство. – 2000. – № 7. – С. 53–55.
2. Влияние внешнего электромагнитного поля на скорость плавления электродной проволоки при автоматической наплавке под флюсом / П. А. Иофинов, В. С. Ибрагимов, А. К. Дмитриенко [и др.] // Сварочное производство. – 1991. – № 1. – С. 34–35.
3. Размышляев А. Д. Скорость потоков в ванне при дуговой наплавке в поперечном магнитном поле / А. Д. Размышляев // Сварочное производство. – 2014. – № 4. – С. 8–12.
4. Рыжов Р. Н. Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (обзор) / Р. Н. Рыжов, В. Д. Кузнецов // Автоматическая сварка. – 2006. – № 10. – С. 36–44.
5. Андреева Е. Г. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS [Электронный ресурс] / Е. Г. Андреева, С. П. Шапец, Д. В. Колмогоров // Electronic scientific journal "Oil and Gas Business". – 2005. – № 1. – Режим доступа до журн.: http://ogbus.ru/authors/Andre-eva/Andreeva_1.pdf.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2003. – 317 с.
7. Тозони О. В. Метод вторичных источников в электротехнике / О. В. Тозони. – М. : Энергия, 1975. – 296 с.

Статья поступила в редакцию 11.05.2018 г.