

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ИНДУКТОРА ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Г. Е. Левшин

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,  
г. Барнаул, Россия

Показана возможность расчетного определения с использованием безразмерных параметров распределения аксиальной  $B_z$  и радиальной  $B_r$  составляющих вектора индукции и самого результирующего вектора  $B_p$  по некоторым характерным точкам в полости и за пределами практически любого по размерам индуктора (без садки). Проведено сравнение такого распределения в рабочей полости и снаружи высокого и низкого индуктора с графическим и математическим описанием.

**Ключевые слова:** индуктор печи, вектор магнитной индукции, магнитное поле рассеяния, сплошной и дискретный экран

## THE DEFINITION OF THE MAGNETIC INDUCTION FURNACE INDUCTOR

G. E. Levshin

Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The possibility of a settlement determination using dimensionless parameters of the distribution of the axial  $B_z$  and radial  $B_r$  components of the induction vector and the resulting vector  $B_p$  for some characteristic points in the cavity and the outside of virtually any size inductor (without cages). A comparison of the distribution in the working chamber and the outside of the high and low inductor graphical and mathematical description. Proved insufficient effectiveness of the screening of discrete scattering field in the inductor furnace ICHT-31.

**Keywords:** inductor furnace, magnetic induction, magnetic stray field, the continuous and discrete screen

В плавильной индукторной индукционной печи (ИП) однофазный индуктор, выполненный в виде цилиндрической однослойной спиральной электрической катушки (ЭК), имеет высоту  $h$ , близкую к внутреннему диаметру  $D_{вн}=2r_{вн}$ . Их отношение  $\beta=h/D_{вн}=0,8...1,5$ . С его увеличением повышается эффективность плавки, но затрудняется футеровка высокого и узкого тигля и загрузка в него крупной шихты [1 – 4]. ЭК создает в воздухе (без садки) очень неоднородный вертикальный полный магнитный поток  $\Phi$  (поле) (рисунок 1) [1]. Поток  $\Phi$  имеет близкую к тороидальной форму и разное направление векторов индукции относительно центра индуктора, а также неравномерное распределение величины индукции как в его рабочей полости, так и вне ее. Он разделяется на две примерно равные части: рабочий  $\Phi_{раб}$ , действующий в рабочем объеме печи, и рассеяния  $\Phi_{рас}$ , действующий за пределами рабочего объема.

Величина индукции потока рассеяния оказывает вредное воздействие на электропроводные элементы конструкции печи и обслужи-

вающий персонал. В доступной литературе по индукционным печам не обнаружена информация о степени распространения этой индукции, в т. ч. в разных по размерам печах. Однако имеются рекомендации о локализации этого потока в печах средней вместимости сплошными экранами в виде цилиндрической оболочки из алюминиевых, медных и стальных ферромагнитных сплавов. Их располагают внутри каркаса печи, по возможности, на некотором удалении от витков ЭК в области с малой индукцией во избежание их сильного нагрева [3, 4]. Но в крупных печах такое решение нецелесообразно, т. к. малое значение индукции имеет место на довольно большом расстоянии от индуктора, что приводит к необоснованному увеличению габаритов печи. Поэтому применяют дискретные экраны в виде отдельных I-образных наборных магнитопроводов из пластин трансформаторной стали [3, 4]. Их, наоборот, располагают ближе к виткам ЭК в области повышенной индукции. Однако полная экранизация в этом случае не достигается, т. к. между отдельными магнитопроводами имеют-

ся существенные промежутки для распространения поля рассеяния за их пределы в радиальном направлении.

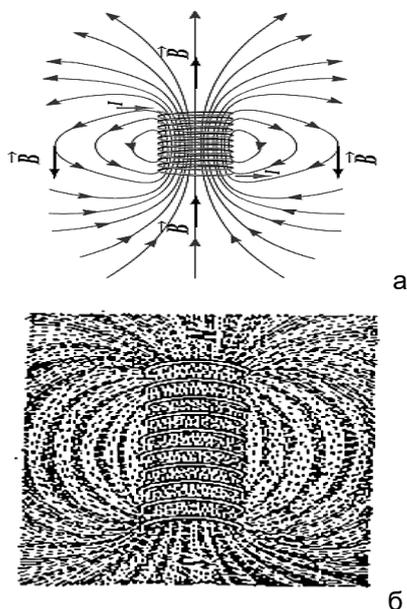


Рисунок 1 – Схема (а) и опилочная модель (б) магнитного потока индуктора

Поэтому представляет научный и практический интерес количественная оценка расчетным путем степени распространения индукции в различных по размерам ЭК. Для этого необходимы и другие основные параметры ЭК: внутренний радиус  $r_{вн}$ , наружный радиус  $r_n$ , аксиальное расстояние  $z$  от горизонтальной геометрической оси до заданной точки вдоль или параллельно вертикальной геометрической оси, радиальное расстояние  $R$  от вертикальной геометрической оси до заданной точки, магнитная индукция  $B_0$  в геометрическом центре рабочей полости. Обычно относительная толщина намотки ЭК не превышает  $\alpha=r_n/r_{вн}=1,5$ . Поэтому используем его в дальнейшем.

Распределение аксиальной  $B_z$  и радиальной  $B_r$  составляющих вектора индукции по некоторым характерным точкам в полости и за пределами такой ЭК можно найти расчетом с использованием безразмерных параметров [5]. Это относительные: аксиальная  $B'_z=B_z/B_0$  и радиальная  $B'_r=B_r/B_0$  составляющие вектора индукции, вертикальное удаление  $L=z/0,5h$  заданной точки от горизонтальной геометрической оси, текущий радиус  $R'_r=R/r_{вн}$ .

Определим табличные параметры относительной аксиальной составляющей индукции  $B'_z=B_z/B_0$  в зависимости от произвольного текущего радиуса  $R'_r=R/r_{вн}$  для некоторых характерных значений:  $\beta=0,5h/r_{вн}=1$  и 2 (когда ЭК невысокая  $h=D_{инд}$  и высокая  $h=2D_{инд}$ ),  $\alpha=$

$r_n/r_{вн}=1,5$ ,  $L=z/0,5h=0,0, 0,5, 1,0, 1,5$  и  $2,0$  (в центре ЭК, на удалении от него, на ее торцах и на двух уровнях удаления за ее пределы). Они помещены в таблице 1 и по ним построены графики зависимости  $B'_z=f(L)$  и  $B'_z=f(R'_r)$  на рисунках 2, 3. Все графики аппроксимировали уравнениями 3 степени с достоверностью 1 (линии тренда).

Внутри ЭК при  $R'_r=1,0$  и  $\beta=1$   $B'_z=0,0538L^3 - 0,4938L^2 + 1,0413L + 0,57$ ,

$\beta=2$   $B'_z=0,0594L^3 - 0,5401L^2 + 1,1549L + 0,3586$ .

Снаружи ЭК при  $R'_r=1,25$  и  $\beta=1$   $B'_z=0,0126L^3 - 0,1191L^2 + 0,24L + 0,3222$ ,

$\beta=2$   $B'_z=0,0188L^3 - 0,173L^2 + 0,3537L + 0,2595$ .

Снаружи ЭК при  $L=0,0$ ,  $\beta=1$   $B'_z=-0,0164R'^3_T + 0,1614R'^2_T - 0,5624R'_T + 0,8731$ ,

$\beta=2$   $B'_z=0,0546R'^3_T - 0,4915R'^2_T + 1,4367R'_T + 1,4587$ .

Анализ этих данных показывает:

1) аксиальная составляющая индукции  $B'_z$  имеет максимальные значения в среднем поперечном сечении ЭК непосредственно у ее витков (при  $L=0,0$  и  $R'_r=1,0$ ). При увеличении координаты  $L$  (или  $z$ ) от середины ЭК к ее торцам  $B'_z$  всегда уменьшается, причем в рабочей полости (при  $R'_r$  и  $L$  до 0,5) она уменьшается очень медленно, а затем гораздо быстрее почти в 2 раза до  $L=1,0$  (рисунок 2, два верхних графика). Аналогичное уменьшение наблюдается и на таком же расстоянии за пределами торцов до  $L=1,5$ , особенно в высокой ЭК. В диапазоне  $L=1,5...2,0$  оно менее заметно. У боковой наружной цилиндрической поверхности ЭК (при  $R'_r=1,25$ ) величина  $B'_z$  заметно меньше, а характер ее убывания более плавный (рисунок 2, два нижних графика);

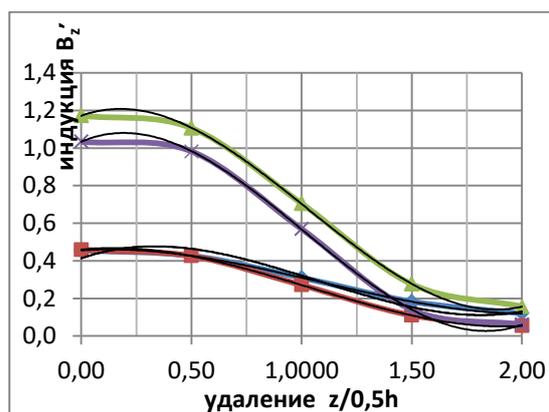


Рисунок 2 – Графики убывания аксиальной составляющей  $B'_z$  вектора индукции при удалении  $L=z/0,5h$  от среднего горизонтального сечения ЭК: при  $R'_r=1,0$ ,  $\beta=1$  и 2 и снаружи при  $R'_r=1,25$ ,  $\beta=1$  и 2 (расположение графиков сверху вниз)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ИНДУКТОРА ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

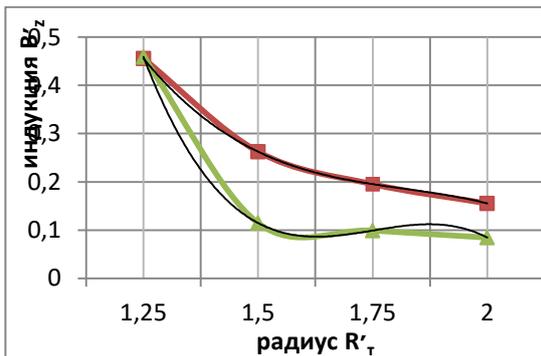


Рисунок 3 – Графики убывания аксиальной составляющей  $B'_z$  вектора индукции при удалении  $R'_r$  от наружной цилиндрической поверхности ЭК на уровне ее среднего поперечного сечения ( $L=0,0$ ,  $\beta=1$  – верхняя кривая и  $\beta=2$  – нижняя кривая)

2) аксиальная составляющая индукции  $B'_z$  в рабочей полости (при  $R'_r$  до 1,0) как минимум в 2 раза больше, чем у боковой наружной цилиндрической поверхности ЭК (при  $R'_r$  более 1,0). По мере удаления от этой поверхности индукция  $B'_z$  в среднем сечении (при  $L=0,0$ ) сначала убывает очень быстро ( $R'_r$  до 1,5), а затем медленнее (рисунок 3).

Особенно это заметно у высокой ЭК (при  $\beta=2$ ). На уровне же торца ЭК (при  $L=1,0$ ) величина индукции  $B'_z$  существенно меньше, но характер убывания аналогичен;

3) величина аксиальной составляющей индукции  $B'_z$  в сопоставимых точках почти всегда больше в невысокой ЭК ( $\beta=1$ ) по сравнению с высокой ( $\beta=2$ );

4) аксиальная составляющая индукции  $B'_z$  в рабочей полости (при  $R'_r$  до 1,0) увеличивается в радиальном направлении от геометрической оси к виткам ЭК, особенно заметно у невысокой ЭК;

5) максимальное значение  $B'_z$  наблюдается на уровне среднего горизонтального сечения ЭК (при  $L=0,0$ ) по сравнению с другими уровнями.

Аналогично найдем параметры относительной радиальной составляющей индукции  $B'_r=B_r/B_0$  в зависимости от произвольного радиуса  $R'_r=R/r_{вн}$  для тех же характерных значений. Они помещены в таблице 2. По этим данным построены и точечные графики зависимости  $B'_r=f(R'_r)$  для  $L=1,0$  и  $\beta=1$  и 2 (рисунок 4), включающие точки с максимальным значением  $B'_r$ .

Таблица 1 – Значения составляющей индукции  $B'_z$  в низком и высоком индукторе при различных величинах относительного радиуса  $R'_r$  и удаления  $L$

Радиус $R'_r=R/r_{вн}$	Относительная аксиальная составляющая индукции $B'_z=B_z/B_0$ при $z/0,5h$									
	0,0		0,5		1,0		1,5		2,0	
	$\beta=1$	$\beta=2$	$\beta=1$	$\beta=2$	$\beta=1$	$\beta=2$	$\beta=1$	$\beta=2$	$\beta=1$	$\beta=2$
0,00	1,0000	1,0000	0,9122	0,9138	0,6763	0,5627	0,4141	0,2023	0,2360	0,0773
0,25	1,0111	1,0023	0,9223	0,9153	0,6778	0,5629	0,4079	0,1983	0,2310	0,0761
0,5	1,0444	1,0091	0,9542	0,9316	0,6824	0,5632	0,3873	0,1862	0,2156	0,0728
0,75	1,0992	1,0197	1,0134	0,9535	0,6896	0,5639	0,3459	0,1662	0,1905	0,0677
1,0	<b>1,1717</b>	<b>1,0333</b>	1,1061	0,9855	0,7047	0,5691	0,2760	0,1398	0,1572	0,0611
1,25	0,4557	0,4589	0,4268	0,4255	0,3103	0,2709	0,1832	0,1100	0,1197	0,0536
1,5	0,2626	0,1148	0,2579	0,1321	0,0865	0,0294	0,0964	0,0813	0,0839	0,0459
1,75	0,1953	0,0991	0,1761	0,1043	0,0670	0,0216	0,0395	0,0570	0,0543	0,0384
2,0	0,1535	0,0845	0,1242	0,0822	0,0571	0,0202	0,0099	0,0385	0,0324	0,0314

Примечание. Максимальные значения  $B'_z$  выделены жирным шрифтом.

Таблица 2 – Значения составляющей индукции  $B'_r$  в низком и высоком индукторе при различных величинах относительного радиуса  $R'_r$  и удаления  $L$

Радиус $R'_r=R/r_{вн}$	Относительная радиальная составляющая индукции $B'_r=B_r/B_0$ при $z/0,5h$									
	0,25		0,5		1,0		1,5		2,0	
	$\beta=1$	$\beta=2$	$\beta=1$	$\beta=2$	$\beta=1$	$\beta=2$	$\beta=1$	$\beta=2$	$\beta=1$	$\beta=2$
0,25	0,0222	0,0099	0,0437	0,0242	0,0705	0,0592	0,0570	0,0267	0,0327	0,0081
0,5	0,0446	0,0190	0,0897	0,0468	0,1509	0,1252	0,1154	0,0517	0,0633	0,0157
0,75	0,0658	0,0265	0,1374	0,0660	0,2588	0,2106	0,1732	0,0730	0,0892	0,0223
1,0	0,0813	0,0316	0,1773	0,0791	0,4898	0,3856	0,2201	0,0879	0,1070	0,0274
1,25	0,0853	0,0342	0,1892	0,0844	<b>0,6392</b>	<b>0,4989</b>	0,2354	0,0946	0,1142	0,0310
1,5	0,0764	0,0341	0,1648	0,0818	0,4523	0,3621	0,2110	0,0931	0,1163	0,0329
1,75	0,0602	0,0321	0,1235	0,0736	0,2270	0,1956	0,1669	0,0855	0,0996	0,0334
2,0	0,0440	0,0287	0,0866	0,0630	0,1438	0,1331	0,1255	0,0751	0,0852	0,0327

Примечание. 1. При  $L=z/0,5h=0,0$  и любом значении радиуса  $R'_r=R/r_{вн}=0,00$  индукция  $B'_r=B_r/B_0$  всегда равна 0 для всех значений  $\beta$ , т. к. радиальная составляющая в среднем поперечном сечении ЭК равна 0.

2. Максимальные значения  $V'_r$  выделены жирным шрифтом.

Анализ этих данных показывает:

1) радиальная составляющая индукции  $V'_r$  на оси ЭК и в ее среднем поперечном сечении (при  $L=0,0$ ) всегда равна 0. Затем при увеличении координаты  $z$  (или  $L$ )  $V'_r$  всегда увеличивается (до  $R'_T=1,25$  при  $\beta=1$  и 2), после чего индукция начинает уменьшаться. Ее максимальное значение  $V'_r = 0,6392$  (при  $\beta=1$ ) и  $0,4989$  (при  $\beta=2$ ) имеет место у торцов ЭК возле ее наружной цилиндрической поверхности и оно почти в 2 раза меньше максимального значения аксиальной составляющей индукции  $V'_z$  в рабочей полости (рисунки 2 и 4);

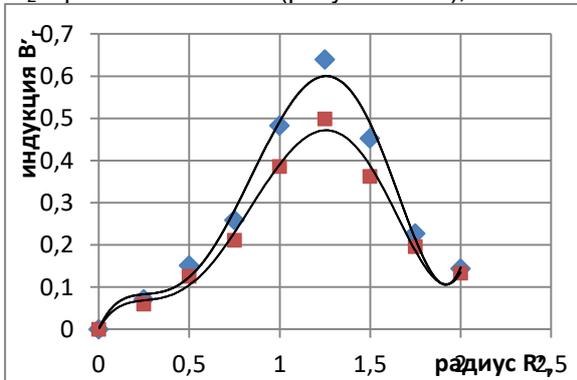


Рисунок 4 – Точечный график изменения радиальной составляющей  $V'_r$  вектора индукции при удалении  $R'_T$  от вертикальной оси ЭК за пределы ее наружной цилиндрической поверхности на уровне торца ( $L=1,0$ ,  $\beta=1$  – ромбические точки и  $\beta=2$  – квадратные точки)

2) точечный график зависимости  $V'_r=f(R/r_{вн})$  имеет пикообразный вид с явно выраженным максимумом и резким переходом его возрастающей части на нисходящую (рисунок 4). Его аппроксимация (см. линии тренда) возможна уравнением 5 – 6 степени с достоверностью:

$$0,9876 \text{ при } \beta=1 \quad V'_r = 1,0582R'^5_T - 5,2595R'^4_T + 7,8208R'^3_T - 4,1725R'^2_T + 0,9639R'_T + 0,9516$$

$$\text{при } \beta=2 \quad V'_r = -1,549R'^6_T + 10,111R'^5_T - 24,448R'^4_T + 26,244R'^3_T - 11,812R'^2_T + 1,953R'_T.$$

Для повышения достоверности можно аппроксимировать эти части графика порознь: для  $\beta=1$  восходящая часть уравнением 2-ой степени –  $V'_r = 0,269R'^2_T + 0,1673 R'_T$  (с достоверностью 0,9935), а нисходящая – уравнением 3-ей степени  $V'_r = 1,9253R'^3_T - 8,9712 R'^2_T + 12,973R'_T - 5,3198$  (с достоверностью 1); для  $\beta=2$  восходящая и нисходящая части уравнением 3-ей степени –  $V'_r = 1,5083R'^3_T - 1,48R'^2_T + 0,973R'_T - 0,5735$  (с достоверностью 0,9955) и  $V'_r = 0,8197R'^3_T - 3,6677R'^2_T + 4,8123R'_T - 1,3804$  (с достоверностью 0,9988).

Особо отметим, что при любом виде ап-

проксимации область возле максимума необходимо уточнять.

Все уравнения аппроксимации позволяют вычислить любые промежуточные значения  $V'_z$  и  $V'_r$  в указанном диапазоне и прогнозировать при обоснованном выходе за его пределы.

Зная значения составляющих  $V'_z$  и  $V'_r$ , можно вычислить величину результирующего вектора  $V_p = (V'^2_z + V'^2_r)^{0,5}$  в наиболее значимых точках (в т. ч. с максимальным значением  $V'_z$  или  $V'_r$ ).

Так, в полости ЭК у ее витков ( $R'_T=1,0$ ):

в среднем поперечном сечении ( $L=0,0$ ) при  $\beta=1$   $V_p = [(1,1717V_0)^2 + (0,0813V_0)^2]^{0,5} = 1,1746V_0$ ,  $\beta=2$   $V_p = [(1,0333V_0)^2 + (0,0316V_0)^2]^{0,5} = 1,042V_0$  и т. д., у торца ( $L=1,0$ ) при  $\beta=1$   $V_p = 0,768V_0$ , а при  $\beta=2$   $V_p = 0,6875V_0$ .

**Снаружи ЭК** индукция  $V_p$  всегда меньше. Так, при  $R'_T=1,25$ :

– в среднем поперечном сечении ( $L=0,0$ ) при  $\beta=1$   $V_p = V_z = 0,4557V_0$ , а при  $\beta=2$   $V_p = 0,4589V_0$ ;

– у торца ( $L=1,0$ ) при  $\beta=1$   $V_p = 0,71V_0$ , а при  $\beta=2$   $V_p = 0,567V_0$ .

**При удалении**  $R'_T=2,0$  индукция  $V_p$  существенно уменьшается, но все еще остается неприемлемо высокой:

– в среднем поперечном сечении ( $L=0,0$ ) при  $\beta=1$   $V_p = V_z = 0,1535V_0$ , а при  $\beta=2$   $V_p = V_z = 0,0845V_0$ ;

– у торца ( $L=1,0$ ) при  $\beta=1$   $V_p = 0,1545V_0$ , а при  $\beta=2$   $V_p = 0,145V_0$ ;

– на удалении от торца ( $L=2,0$ ) при  $\beta=1$   $V_p = 0,091V_0$ , а при  $\beta=2$   $V_p = 0,0446V_0$ ;

Обратим внимание на то, что в полости низкой ЭК индукция  $V_p \sim$  в 1,1 раза больше, чем в высокой, и она действует в меньшем объеме (при равных диаметрах  $D_{вн}$ ). Это приводит к повышенным градиентам индукции как в аксиальном, так и радиальном направлениях и, как следствие, интенсификации перемешивания расплава. Градиенты направлены под разным наклоном к виткам, причем в верхней половине ЭК вниз, а в нижней наоборот вверх, т. е. зеркально.

Покажем применение полученных результатов на конкретном примере.

В чугуноплавильной печи ИЧТ-31 с промышленной частотой  $f=50$  Гц и вместимостью 31 т индуктор имеет следующие параметры: внутренний радиус индуктора  $r_{вн} = 0,985$  м, площадь поперечного сечения  $S_{ЭК} = \pi r_{вн}^2 = 3,046$  м<sup>2</sup>, наружный радиус  $r_n = 0,985 + 0,07 = 1,055$  м при ширине трубки индуктора 0,07 м, высота  $h = 1,8$  м,  $\alpha = r_n / r_{вн} = 1,055 / 0,985 = 1,07$ ,  $\beta = 0,5h / r_{вн} = 0,9 / 0,985 = 0,913$ , число витков индуктора  $w = 21$  шт [4]. При максимальном же напряжении на индукторе  $U_{ЭК} = 2430$  В сила тока в нем

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ИНДУКТОРА ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

достигает  $I_{\text{ЭК}} = 18628$  А, а магнитодвижущая сила  $I_{\text{ЭК}}w = 18628 \cdot 23 = 428444$  А. При этом в центре индуктора (без садки) создаются максимальные напряженность  $H_0 = I_{\text{ЭК}}w/h = 428444/1,8 = 238024,4$  А/м и индукция  $B_0 = \mu_0 H_0 \approx 1,256 \times 10^{-6} \cdot 238024,4 \approx 0,298958$  Тл [4].

По известной величине  $B_0$  можно найти значения индукции  $B_p$  в характерных точках у наружной поверхности индуктора.

**В среднем поперечном сечении** ( $L=0,0$ ) при:

$R'_T=1,1$  индукцию определим приближенно из уравнения аппроксимации  $B'_z = -1,0507R'^3_T + 5,7344R'^2_T - 10,566R'_T + 6,7557 = 0,6743$ . Поскольку  $B'_T=0$ , то  $B_p = B_z = 0,6743 \times 0,298958 = 0,2$  Тл.

$R'_T=1,25$   $B_p = 0,4557B_0 = 0,4557 \times 0,298958 = 0,138$  Тл, а при  $R'_T=2,0$   $B_p = 0,153 \times 0,298958 = 0,0457$  Тл.

**У торца** ( $L=1,0$ ) при  $R'_T=1,25$   $B_p = 0,71 \times 0,298958 = 0,212$  Тл, а при  $R'_T=2,0$   $B_p = 0,1545 \times 0,298958 = 0,046$  Тл.

**На удалении от торца** ( $L=2,0$  и  $R'_T=2,0$ )  $B_p = 0,091 \times 0,298958 = 0,0272$  Тл.

Можно видеть, что во всех этих точках, в т. ч. удаленной от индуктора на величину его радиуса, значение индукции недопустимо высоко и превышает  $0,0272$  Тл. Это значительно больше предельно допустимого уровня (ПДУ) величины индукции переменного магнитного поля частотой  $50$  Гц, которая составляет  $0,0001$  Тл и  $0,0005$  Тл при воздействии в течение  $8$  и  $4$  часов, соответственно [6]. Более того, даже в точке, удаленной от индуктора на  $4,5$  его радиуса в радиальном направлении ( $\sim 4,5$  м) и на высоту ЭК в аксиальном направлении ( $\sim 2$  м), индукция составляет  $B_p = 0,013B_0 = 0,013 \times 0,298958 = 0,0039$  Тл и превышает ПДУ. С увеличением частоты поля вредное воздействие увеличивается, а ПДУ уменьшается.

Эти данные показывают также, что каждый из  $24$ -х I-образных вертикальных магнитопроводов помещен в поле с индукцией  $B_p \approx 0,2$  Тл. Проектировщиками принято (без объяснений) значение индукции в материале магнитопровода  $B_m = 1$  Тл, при котором величина относительной магнитной проницаемости составляет только  $\mu_m = B_m/B_p = 5$ . Малое значение  $\mu_m$  является следствием разомкнутости магнитной цепи и большим размагничивающим действием стержневых магнитопроводов длиной  $2$  м. Исходя из  $B_m = 1$  Тл определена по эмпирической формуле (не имеющей физического смысла)  $S_m = U_{\text{ЭК}} / (4,44fwB_m)$  их общая площадь поперечного сечения  $S_m = 0,5$  м<sup>2</sup> и каждого из них  $0,0208$  м<sup>2</sup> (размером  $0,16 \times 0,13$  м), а также общая масса  $\sim 7$  т.

Следовательно, магнитный поток  $\Phi_m$  в магнитопроводе составляет  $\Phi_m = B_m S_m = 0,5$  Вб.

Полный же поток, создаваемый индуктором (без садки),  $\Phi \approx B_0 S_{\text{ЭК}} \approx 0,298958 \times 3,046 \approx 0,91$  Вб, или в  $1,8$  раза больше  $\Phi_m$ . Такая разница может свидетельствовать о недостаточной эффективности магнитопроводов, которые не экранируют значительную часть полного потока, и нуждается в объяснении. Не вполне ясна и степень увеличения магнитопроводами индукции в рабочей полости ЭК, в т. ч. с ферромагнитной и неферромагнитной садкой. На торцах же этих магнитопроводов, являющихся их полюсами, индукция безусловно больше вследствие их намагничивания, чем без магнитопроводов. Поэтому наиболее опасно нахождение персонала возле открытого тигля и над торцами магнитопроводов (даже при наличии рабочей площадки из ферромагнитной стали).

Суммарная ширина всех магнитопроводов составляет  $0,16 \times 24 = 3,84$  м, а длина наружной окружности индуктора (с учетом изоляции)  $6,62$  м. При этом на все промежутки между магнитопроводами приходится  $6,62 - 3,84 = 2,78$  м (или  $\sim 0,11$  м на один). Через них поле рассеяния может распространяться довольно далеко. Для предупреждения этого целесообразно устранить эти промежутки и изготовить магнитопровод кольцевым для полного охвата индуктора снаружи. При этом толщина магнитопровода может уменьшиться со  $130$  до  $72$  мм (без изменения массы). Попутно увеличится значение индукции и равномерность ее распределения в рабочей полости индуктора с возможным улучшением эффективности плавки.

### Выводы.

Подтверждена возможность расчетного определения с использованием безразмерных параметров распределения аксиальной  $B_z$  и радиальной  $B_r$  составляющих вектора индукции и самого результирующего вектора  $B_p$  по некоторым характерным точкам в полости и за пределами практически любой по размерам ЭК (без садки).

Аксиальная  $B_z$  составляющая вектора индукции всегда постепенно убывает в направлении от среднего поперечного сечения ЭК как в ее полости, так и за пределами. Графики такого убывания аппроксимируются уравнениями 3-ей степени.

Радиальная  $B_r$  составляющая вектора индукции изменяется по экстремальному закону, увеличиваясь в полости ЭК и уменьшаясь снаружи.

В полости низкой ЭК результирующая индукция  $B_p \sim$  в  $1,1$  раза больше, чем в высокой, и она действует в меньшем объеме (при

равных диаметрах  $D_{вн}$ ). Это приводит к повышенным градиентам индукции, как в аксиальном, так и радиальном направлениях и, как следствие, интенсификации перемешивания расплава.

Полученные результаты по распределению индукции могут быть использованы для более точного расчета сплошных и дискретных экранов, т. к. показали недостаточную эффективность дискретного экрана в индукторе печи ИЧТ-31.

Наиболее опасно нахождение персонала возле открытого тигля и над торцами магнитопроводов (даже при наличии рабочей площадки из ферромагнитной стали).

#### Список литературы

1. Левшин Г. Е. Научно-технические технологии индукционной плавки в индукторных и электромагнитных тигельных печах // Научно-технические технологии в машиностроении, 2016, № 3. С. 12 – 21.

2. Левшин Г. Е., Малышев И. В. Об индукционных тигельных печах и плавке // Заготовительные производства в машиностроении, 2016, № 3. С. 7 – 13.

3. Современные плавильные агрегаты: сборник. – М.: ИТЦМ Металлург, 2014. 370 с.

4. Электрические печи для выплавки черных и цветных сплавов. /Л. М. Романов, А.Н. Болдин, А. Н. Граблев, Д.П. Михайлов. – МГИУ, 2007. 104 с.

5. By Gerald V. Brown, Laurence Flax, Eugene C. Itean, James C. Laurence. Axial and radial magnetic fields of thick finite-length solenoids. – Washington: NASA, 1964. 98s.

6. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях»

*Левшин Геннадий Егорович – д. т. н., профессор*

*ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия*