

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СТАЛЬНОЙ КОЛОННОЙ

**В.Ю.Розов**, чл.- корр. НАН Украины, **С.Ю.Реуцкий**, канд.техн.наук, **С.В.Левина**  
 Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины,  
 ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина.  
 e-mail: [Rozov@nas.gov.ua](mailto:Rozov@nas.gov.ua)

*Разработан аналитический метод расчета магнитоэлектростатического поля для задач с осевой симметрией, основанный на концепции вторичных источников с использованием фиктивных магнитных зарядов, расположенных вне граничной поверхности ферромагнитного тела. Предложена методика оценки интенсивности ослабления геомагнитного поля (ГМП) стальной цилиндрической колонной с помощью коэффициента гипогеомагнитности, характеризующего объем пространства вблизи колонны, где ослабление ГМП превышает предельный гигиенический уровень. Показано, что коэффициент гипогеомагнитности колонны имеет максимум при относительной протяженности  $b$  колонны от 2 до 24, а затем спадает до нуля при  $b > 26$ , что вызвано конкурирующими процессами роста объема и снижения коэффициента размагничивания колонны при росте  $b$ . Подготовлены рекомендации по проектированию магнитоэлектростатических колонн зданий, оказывающих минимальное влияние на уровень ГМП в их жилых и общественных помещениях. Библиограф. 16, рис. 5.*

**Ключевые слова:** статическое магнитное поле, ослабление геомагнитного поля, стальная колонна.

**Введение.** Известно, что ослабленное статическое геомагнитное поле (гипогеомагнитное поле), создаваемое в помещениях современных зданий стальными элементами строительных конструкций, отрицательно воздействует на здоровье людей [6, 7, 12]. Так, при ослаблении естественного для Украины геомагнитного поля (ГМП) с индукцией 48–50 мкТл до 25 мкТл и менее наблюдаются негативные эффекты в нервной и иммунной системах человека, а при ослаблении до 13 мкТл и менее – и в сердечнососудистой системе [9].

По этой причине в ряде стран мира, например, в России приняты государственные санитарные нормы по предельным уровням ослабления индукции ГМП в жилых помещениях – не менее 30 мкТл [1]. Международным стандартом SBM–2008 [15], который является руководящим документом при независимом тестировании домов в Европе, США, Канаде, Австралии, рекомендован не вызывающий экстремальных последствий у здоровья людей предельный уровень отклонения ГМП в жилых помещениях не более  $\pm 10$  мкТл. Работы по исследованию, санитарному нормированию и нормализации уровня ослабления ГМП ведутся и в Украине [7–9]. Однако явление ослабления ГМП исследовано недостаточно.

**Постановка задачи исследований.** Проведенный в [8] анализ показывает, что наибольшее влияние на ГМП в помещениях оказывают колонны ферромагнитного каркаса здания. Колонны имеют наибольший объем ферромагнитных масс и интенсивно намагничиваются вертикальной составляющей ГМП, которая на территории Украины практически в три раза превышает его горизонтальную составляющую. Так, для г. Харькова вектор индукции естественного ГМП имеет вертикальную составляющую 46,6 мкТл, горизонтальную – 18,1 мкТл и модуль 50 мкТл.

Поэтому влияние ферромагнитного каркаса здания на ГМП в помещении будем моделировать задачей искажения однородного магнитного поля (МП) колонной, состоящей из конструкционной стали, либо выполненной в виде железобетонной конструкции со стальной арматурой. Однако реальная конструкция колонны сложна для анализа и требует отдельного рассмотрения. В связи с этим моделирование производим для сплошного ферромагнитного тела вращения цилиндрической формы. Примем и другие допущения, упрощающие анализ и позволяющие сохранить основные свойства моделируемого явления. Колонну представим как сплошной ферромагнитный цилиндр из материала с начальной магнитной проницаемостью  $\mu_2$ , которая при намагничивании слабым ГМП неизменна. Остаточная намагниченность колонны отсутствует. Принимается во внимание только вертикальная составляющая ГМП. Другие допущения будут приведены в ходе описания метода решения задачи.

Таким образом, исследуемая цилиндрическая стальная колонна (рис. 1) с высотой  $h$  и радиусом  $a$  находится в однородном внешнем МП с напряженностью  $\mathbf{H}_0$ , имеющем единственную вертикальную компоненту, направленную по оси  $z$ ,

$$\mathbf{H}_0 = -(0, 0, H_0). \quad (1)$$

Пространство разделим на две области. Обозначим  $\Omega_1$  внешнюю область пространства, в которой находится цилиндрическая колонна и которая является бесконечной. Область  $\Omega_2$  заполнена телом колонны. Области  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  разделяет граница  $\Gamma$ .

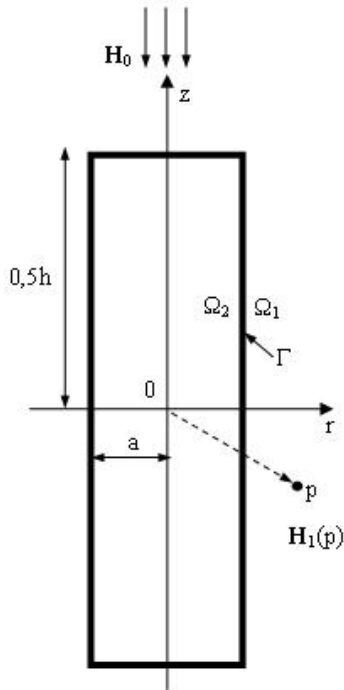


Рис. 1

Предполагаем, что область  $\Omega_1$  имеет магнитную проницаемость  $\mu_1=1$ , а область  $\Omega_2$  –  $\mu_2 > 1$ . Моделирование явления ослабления ГМП будем осуществлять, определяя напряженность  $\mathbf{H}_1(p)$  искаженного ГМП в точках  $p$  области  $\Omega_1$  (рис. 1)

$$\mathbf{H}_1(p) = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_j(p), \quad p \in \Omega_1, \quad (2)$$

где  $\mathbf{H}_j(p)$  – напряженность МП, создаваемая в точке  $p$  индуктивной намагниченностью колонны. Явление ослабления ГМП возникает в точках  $p$  пространства  $\Omega_1$ , где выполняется условие

$$0 \leq H_1(p) < H_0. \quad (3)$$

Оценку уровня ослабления ГМП в отдельных точках  $p$  пространства будем осуществлять с помощью коэффициента ослабления ГМП  $G(p)$

$$G(p) = H_1(p)/H_0 = |\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_j(p)|/H_0, \quad 0 \leq G < 1. \quad (4)$$

Как следует из (4), уровень ослабления ГМП в точке  $p$  определяется суперпозицией  $\mathbf{H}_0$  и  $\mathbf{H}_j(p)$  и зависит от МП  $\mathbf{H}_j$ , вектор которого в зоне ослабления направлен встречно  $\mathbf{H}_0$ . Значение  $H_j$  может быть выражено функционалом [8]

$$H_j = F(H_0, V_{\Omega_2}, N, \mu_2), \quad (5)$$

где  $V_{\Omega_2}$  – объем цилиндрической колонны;  $N$  – коэффициент размагничивания колонны.

Из (5) следует, что величина  $H_j$  зависит от объема колонны, ее коэффициента размагничивания и магнитной проницаемости.

Выразим объем цилиндра  $V_{\Omega_2}$  (рис. 1) через его радиус  $a$  и коэффициент протяженности  $b$

$$V_{\Omega_2} = 2\pi a^3 b, \quad \text{где } b = 0,5h/a, \quad (6)$$

т.е.  $V_{\Omega_2}$  линейно зависит от коэффициента протяженности  $b$  цилиндра.

Коэффициент размагничивания  $N$  цилиндра зависит от коэффициента его протяженности  $b$  нелинейно и изменяется приблизительно от 0,3 до 0,0004 при изменении  $b$  от 1 до 100 [13].

Таким образом, при увеличении коэффициента протяженности  $b$  цилиндра линейно увеличивается его объем, что вызывает увеличение интенсивности ослабления ГМП. Одновременно с увеличением  $b$  нелинейно падает значение  $N$ , что уменьшает интенсивность ослабления ГМП. Взаимодействие этих двух конкурирующих процессов делает функциональную зависимость (5) нелинейной с экстремумом при определенном значении  $b$ , что может оказывать существенное влияние на явление ослабления ГМП цилиндрической колонной и требует более детальных исследований.

Существенное влияние на уровень ослабления ГМП также может оказывать материал колонны, характеризуемый магнитной проницаемостью  $\mu_2$  (5). Так, широко используемые в строительстве конструкционные стали имеют  $\mu_2 \approx 100$  [4]. Минимальные величины  $\mu_2 = 1,01-1,02$  имеют специальные маломангнитные стали (например, 45Г17Ю3), используемые в кораблестроении.

Для иллюстрации явления ослабления ГМП стальной колонной на рис. 2 показано полученное в программной среде Comsol [16] распределение модуля вектора индукции искаженного индуктивной намагниченностью колонны ГМП под действием вертикальной составляющей ГМП с индукцией  $V_{0z} = 46,6$  мкТл при  $\mu_2=100$ ,  $b=10$ . Интересующая нас зона ослабления ГМП (при  $G(p) < 1$ ) прилегает к боковым поверхностям колонны и распространяется перпендикулярно вектору индукции намагничивающего поля с минимальными значениями  $G(p)$ , лежащими на оси  $r$ .

В зоне ослабления ГМП (рис. 2) двойной штриховкой выделена область, характеризуемая объемом  $V_{Gn}$ , где ГМП ослаблено ниже предельного уровня 40 мкТл, при котором возрастают биологические риски для здоровья людей [15]. В этой области ГМП характеризуется предельным коэффициентом ослабления  $G_n$ , равным 0,8 на внешней границе  $V_{Gn}$ , и значениями  $G(p) \leq 0,8$  в объеме  $V_{Gn}$ .

Оценим свойство колонны ослаблять ГМП до опасного уровня (ее гипогеомагнитность) по величине объема пространства  $V_{Gn}$ , в котором  $G(p) \leq 0,8$ . Для этого будем использовать коэффициент гипогеомагнитности колонны ( $K_{ГК}$ ), определяющий интенсивность ослабления ГМП колонной. Его значение равно объему  $V_{Gn}$ , нормированному относительно радиуса  $a$  колонны

$$K_{ГК} = V_{Gn} / a^3. \quad (7)$$

Тогда опасное ослабление ГМП будет отсутствовать при  $K_{ГК} = 0$  и расти при росте  $K_{ГК}$ .

Таким образом, параметры  $b$ ,  $\mu_2$  колонны (рис. 1) оказывают существенное влияние на интенсивность ослабления ГМП, характеризуемую коэффициентами  $G(p)$  и  $K_{ГК}$ . Анализ этого влияния является предметом наших дальнейших исследований.

**Методы исследований.** Для исследования влияния цилиндрической стальной колонны на интенсивность ослабления статического ГМП вблизи ее поверхности могут быть использованы численные методы решения задач распределения потенциала, предлагаемые в виде пакетов прикладных программ расчета МП (Comsol, ANSYS и др.). Все они основаны на использовании метода конечных элементов (МКЭ) для решения краевой задачи. Однако подобные пакеты сложно использовать для моделирования магнитных явлений, где требуется обеспечить решение в любой заданной точке пространства, которое затем необходимо дифференцировать для определения градиента МП. Кроме того, при использовании МКЭ решение всегда ищется в некоторой замкнутой области и необходимо ставить искусственные условия на его границе.

Поэтому для решения задачи моделирования явления ослабления ГМП необходимо развитие аналитических методов. С этой целью был разработан рассматриваемый ниже аналитический метод моделирования статического ГМП для задач с осевой симметрией, использующий фиктивные магнитные заряды, расположенные вне граничной поверхности колонны.

**Моделирование явления ослабления ГМП цилиндрической колонной.** Намагничивающее колонну ГМП (1) потенциально и может быть записано в виде [5,10]

$$\mathbf{H}_0 = -\nabla U_0, \quad (8)$$

где

$$U_0 = H_0 z. \quad (9)$$

Магнитное поле является потенциальным как вне, так и внутри колонны. Поэтому в каждой из областей можно ввести скалярный магнитный потенциал  $U$

$$\mathbf{H}_i = -\nabla U_i, \quad i = 1, 2. \quad (10)$$

Определение потенциала МП внутри и вне цилиндра (рис. 1) может быть выполнено из условия на границе раздела сред  $\Gamma$  [10]

$$U_0 + U_1 = U_2, \quad (11)$$

$$\mu_1(\partial U_0 / \partial n + \partial U_1 / \partial n) = \mu_2 \partial U_2 / \partial n. \quad (12)$$

Здесь  $U_1$  – потенциал искажающего МП цилиндра;  $U_2$  – потенциал МП внутри цилиндра.

Для решения задачи моделирования будем использовать аналитический метод, основанный на методе вторичных источников [11], согласно которому расчет МП в неоднородной среде может быть сведен к моделированию МП в однородном пространстве, созданном как первичными (реальными), так и вторичными (фиктивными) источниками.

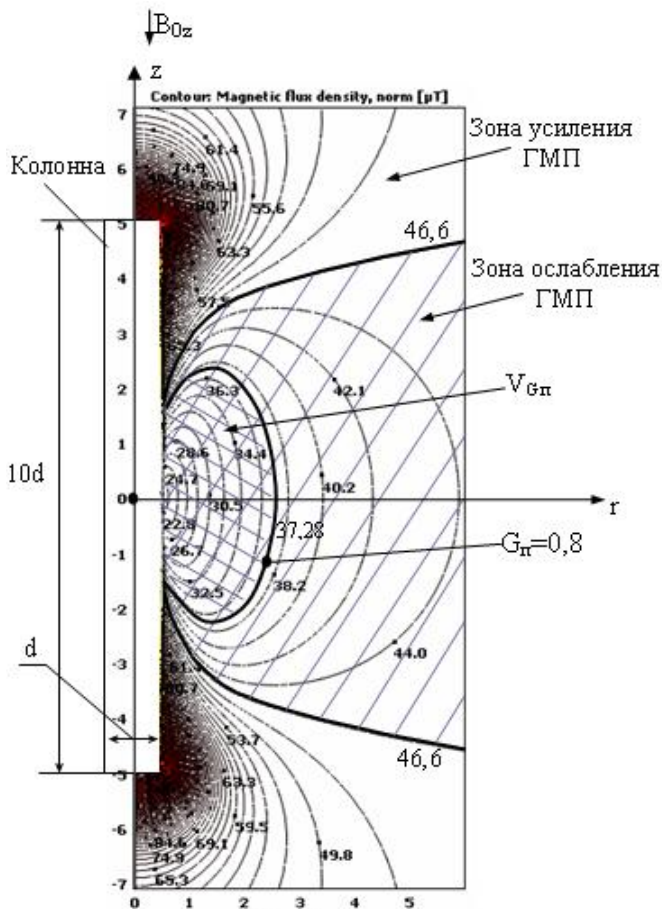


Рис. 2

Для разработки аналитического метода расчета магнитостатического поля осесимметричных объектов используем концепцию вторичных источников [12] и метод фундаментальных решений (МФР) [14], основанных на использовании фиктивных магнитных зарядов кольцевой формы, расположенных вне граничной поверхности колонны. Условием применения такого подхода является распределение источников МП на некотором расстоянии от границы раздела сред, что принято в МФР и обосновано в работе [4] для расчета потенциальных полей. В данной работе МФР используем в форме, предложенной в [14], применимой для расчета МП, искаженного произвольным телом вращения.

Приведем уравнения (8)–(12) к безразмерному виду. Примем за характерный линейный масштаб радиус цилиндра  $a$  (рис. 1) и модуль напряженности внешнего МП  $H_0$  за характерное значение напряженности:  $\mathbf{H}_0 = H_0 \mathbf{H}'_0$ ,  $z = az'$ ,  $r = ar'$ . Здесь апостроф у переменной означает, что это величина безразмерная. В новых переменных уравнение (10) запишется в виде:  $H_0 \mathbf{H}'_i = -[U] a^{-1} \nabla' U_i$ , где  $[U]$  – характерная величина потенциала. Очевидно, что если принять  $[U] = a H_0$ , то все уравнения для безразмерного потенциала запишутся в той же форме что и для размерной величины. В дальнейшем апостроф у безразмерных величин ставить не будем. После введения безразмерных величин потенциал неискаженного МП  $U_0 = z$ , а радиус цилиндра  $a = 1$ .

Запишем аналитическое выражение для потенциала  $U$  в каждой из областей  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , который удовлетворяет следующему уравнению [11]:

$$\partial^2 U / \partial r^2 + (1/r) \partial U / \partial r + \partial^2 U / \partial z^2 = 0, \quad (13)$$

где  $(r, z)$  – цилиндрические координаты. Краевыми условиями для потенциала в осесимметричных координатах являются условия

$$\partial U(0, z) / \partial r = 0; \quad U(r, z) \rightarrow 0, \quad r, z \rightarrow \pm \infty. \quad (14)$$

Фундаментальное решение (13) при условиях (14) может быть записано в виде [14]

$$\Phi(r, z | \xi, \eta) = 4K(4\xi r / \rho^2) \rho^{-1}, \quad \rho = \sqrt{(r + \xi)^2 + (z - \eta)^2}. \quad (15)$$

Здесь  $K(s)$  – полный эллиптический интеграл первого рода [2]

$$K(s) = \int_0^{2\pi} [1 - s^2 \sin^2(\theta)]^{-1/2} d\theta. \quad (16)$$

С физической точки зрения выражение (15) является потенциалом фиктивного магнитного заряда, помещенного в точку с координатами  $(\xi, \eta)$ . С учетом осевой симметрии задачи заряд не точечный, а равномерно распределен по кольцу, проходящему через точку с декартовыми координатами  $x = 0$ ,  $y = \eta$ ,  $z = \xi$ , осью симметрии  $Oz$  и радиусом  $\eta$ . Каждая линейная комбинация потенциалов

$$U(r, z) = \sum_{i=1}^M q_i \Phi(r, z | \xi_i, \eta_i) \quad (17)$$

также удовлетворяет уравнению (13) и является суммарным потенциалом зарядов, расположенных в точках  $(\xi, \eta)$ . Здесь  $q_i$  – произвольные постоянные, имеющие физический смысл величин фиктивных магнитных зарядов, используемых для удовлетворения условий (10) и (11) на поверхности цилиндра.

Заметим, что выражения (15) и (17) удовлетворяют условиям на бесконечности. Поэтому здесь, в отличие от МКЭ, не требуется вводить искусственные краевые условия. Кроме того, такой подход позволяет определять потенциал и его производные в любой точке пространства.

В области  $\Omega_1$  потенциал МП равен сумме известного потенциала внешнего МП (12) и неизвестного возмущающего потенциала  $U_1$ , вызванного намагниченностью колонны, который представим в виде линейной комбинации потенциалов фиктивных магнитных зарядов, аналогичной (17)

$$U_1(r, z) = \sum_{i=1}^M q_i^{(1)} \Phi(r, z | \xi_i^{(1)}, \eta_i^{(1)}) = \sum_{i=1}^M q_i^{(1)} \Phi^{(1)}(r, z). \quad (18)$$

Здесь  $(\xi_i^{(1)}, \eta_i^{(1)})$  – координаты фиктивных магнитных зарядов, расположенных внутри колонны и, следовательно, в пространстве вне колонны потенциал  $U_1(r, z)$  является регулярной, бесконечно дифференцируемой функцией, где  $q_i^{(1)}$  – неизвестные величины фиктивных магнитных зарядов, которые подлежат определению в ходе решения задачи.

Внутренний потенциал  $U_2(r, z)$  запишем в виде

$$U_2(r, z) = \sum_{i=1}^M q_i^{(2)} \Phi(r, z | \xi_i^{(2)}, \eta_i^{(2)}) = \sum_{i=1}^M q_i^{(2)} \Phi^{(2)}(r, z), \quad (19)$$

где  $q_i^{(2)}$  – неизвестные величины фиктивных магнитных зарядов, расположенных в точках  $(\xi_i^{(2)}, \eta_i^{(2)})$  вне возмущающего тела;  $q_i^{(1)}, q_i^{(2)}$  определяем из краевых условий на границе колонны (11), (12). Для этого выберем  $2M$  точек коллокации  $(r_k, z_k), k = 1, \dots, 2M$  на границе возмущающего тела и подставим выражения (18), (19) в уравнения (11), (12), записанные в точках коллокации  $(r_k, z_k)$ . В результате получим систему линейных уравнений для  $q_i^{(1)}$  и  $q_i^{(2)}$

$$\sum_{i=1}^M q_i^{(1)} \Phi^{(1)}(r_k, z_k) + U_0(r_k, z_k) = \sum_{i=1}^M q_i^{(2)} \Phi^{(2)}(r_k, z_k); \quad (20)$$

$$\mu_1 \left[ \sum_{i=1}^M q_i^{(1)} (\partial \Phi^{(1)}(r_k, z_k) / \partial n + \partial U_0(r_k, z_k) / \partial n) \right] = \mu_2 \sum_{i=1}^M q_i^{(2)} \partial \Phi^{(2)}(r_k, z_k) / \partial n. \quad (21)$$

В формуле (21) производные по направлению внешней нормали  $n$  вычисляются как  $\partial \Phi(r, z) / \partial n = n_r \partial \Phi(r, z) / \partial r + n_z \partial \Phi(r, z) / \partial z$ ,

а дифференцирование эллиптических интегралов производится по формулам, приведенным в [3].

Для повышения устойчивости решения выбираем количество точек коллокации вдвое большим количества фиктивных магнитных зарядов. Система уравнений (20), (21) является переопределенной и решается применением стандартной процедуры метода наименьших квадратов.

После решения системы уравнений (20), (21) и нахождения величин фиктивных магнитных зарядов  $q_i^{(1)}, q_i^{(2)}$  можно определить напряженность МП в каждой из сред. Во внешнем пространстве  $\Omega_1$  МП определяется выражением

$$\mathbf{H}_1(r, z) = \mathbf{H}_0(r, z) + \nabla U_1(r, z) = \sum_{i=1}^M q_i^{(1)} \left[ \frac{\partial \Phi^{(1)}(r, z)}{\partial r} \mathbf{e}_r + \left( \frac{\partial \Phi^{(1)}(r, z)}{\partial z} - 1 \right) \mathbf{e}_z \right]. \quad (22)$$

Аналогичное выражение может быть записано для МП внутри колонны.

Таким образом, задав геометрические параметры задачи, которыми являются точки коллокации  $(r_k, z_k), k = 1, \dots, 2M$ , магнитные свойства колонны – начальную магнитную проницаемость  $\mu_2$ , используя формулы (18 – 21), (22), можно определить напряженность МП, а также коэффициент ослабления ГМП  $G(p)$  в любой точке внешнего пространства  $\Omega_1$  (рис. 1).

Объем  $V_{Gn}$  и, следовательно, коэффициент гипогеомагнитности колонны  $K_{ГК}$  при заданном предельном коэффициенте ослабления  $G_n = 0,8$  определяется следующим образом. Квадратная область  $1 \leq r \leq 1+2b, -b \leq z \leq b$  вне колонны последовательно разбивается на ячейки со сторонами  $ds = 2b/m, m=10, 20, 30$ . Внутри каждой ячейки определяются координаты  $(r_c, z_c)$  ее центра, и по формуле (4) вычисляется коэффициент ослабления ГМП  $G(p)$ . При этом модуль напряженности МП в точке  $(r_c, z_c)$  вычислялся по формуле (22). Если  $G(p)$ , вычисленный для центра ячейки, получался меньшим заданного предельного значения  $G_n$ , то объем кольца с радиусом, равным  $r_c$ , и сечением, равным сечению ячейки  $ds^2 = (2b/m)^2$ , суммировался в объем  $V_{Gn}$ . Параметр разбиения  $m$  увеличивается тех пор, пока погрешность вычисления объема  $V_{Gn}$  не станет менее 1%.

**Исследование влияния на ГМП физических параметров колонны.** Используя разработанный метод моделирования, исследуем влияние протяженности  $b$  колонны и ее магнитной проницаемости  $\mu_2$  на коэффициент ослабления ГМП  $G(p)$  и коэффициент гипогеомагнитности  $K_{ГК}$ .

Так, на рис. 3 показано вычисленное по формуле (22) распределение коэффициентов  $G(p)$  для

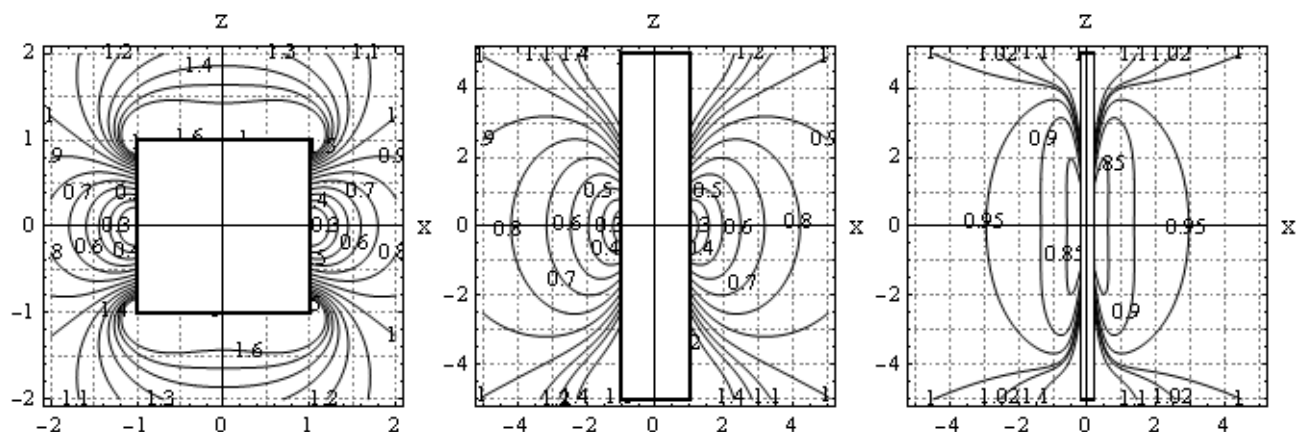


Рис. 3, а, б, в

цилиндрических колонн с  $\mu_2 = 100$  при различных значениях  $b$  (1, 5, и 25 соответственно). Для  $G_{\Pi} = 0,8$  значения  $K_{ГК}$  составили: 10,9 – для  $b=1$ , 207,4 – для  $b=5$  и 7,95 – для  $b=25$ . В размерных величинах при радиусе колонны, равном, например, 0,15 м, объемы  $V_{Гп}$  равны 0,15м<sup>3</sup>, 2,8м<sup>3</sup> и 0,11м<sup>3</sup> для  $b = 1, 5$  и 25 соответственно.

Результаты моделирования (рис. 3) хорошо согласуются с результатами численного эксперимента в среде Comsol (рис. 2) и имеют экспериментальное подтверждение.

На рис. 4 показана функциональная зависимость коэффициента  $G(p)$  от  $b$  для точек, лежащих на оси  $r$  (рис. 1) при различных значениях  $r$  (1; 1,5; 2; 5; 10). Указанная зависимость в диапазоне  $b$  от 1 до 26 имеет явно выраженный нелинейный характер с экстремальными значениями, а затем монотонно возрастает. Такое поведение функции  $G(p) = F(b)$  подтверждает результаты выполненного выше анализа и ее соответствия функционалу (5).

На рис. 5 – искомая функциональная зависимость коэффициента гипогеомагнитности  $K_{ГК}$  цилиндрической колонны от  $b$  при  $\mu_2 = 100$  и  $G_{\Pi} = 0,8$ . Как уже отмечалось, коэффициент  $K_{ГК}$  определяет относительный объем пространства вблизи колонны с объемом  $V_{Гп}$ , в котором интенсивность ослабления ГМП превышает гигиенически нормированное значение. При необходимости получения размерной величины  $V_{Гп}$ , коэффициент  $K_{ГК}$  следует умножить на  $a^3$  [м<sup>3</sup>].

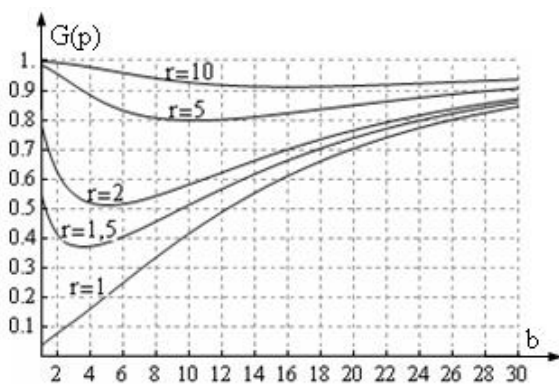


Рис. 4



Рис. 5

Из рис. 5 следует, что, начиная от значения  $b = 1$ , коэффициент  $K_{ГК}$  растет, достигая своего максимума при  $b = 13$ , а затем спадает, и при значениях  $b > 26$  становится равным нулю, что, как было показано выше (5), вызвано конкурирующими процессами увеличения при росте  $b$  объема ферромагнитных масс колонны, увеличивающих коэффициент  $K_{ГК}$ , и нелинейного снижения коэффициента размагничивания колонны, уменьшающего  $K_{ГК}$ .

Таким образом, на основе проведенного анализа можно сделать важный вывод о том, что наиболее интенсивно ослабляют ГМП цилиндрические стальные колонны с коэффициентом протяженности  $b$  в диапазоне от 2 до 24, который назовем критическим. При  $b > 26$  колонны из конструкционной стали не оказывают существенного влияния на интенсивность ослабления ГМП (при условии их целостности по всей длине).

Исследования влияния магнитной проницаемости  $\mu_2$  материала колонны на коэффициент  $K_{ГК}$  в диапазоне  $b \in (1-30)$  показали следующее. Для используемой в строительстве конструкционной стали значение  $\mu_2$  составляет 80–120 [4]. При уменьшении  $\mu_2$  от 120 до 80 существенного изменения  $K_{ГК}$  не происходит. Дальнейшее уменьшение  $\mu_2$  приводит к монотонному уменьшению  $K_{ГК}$ , и при значениях  $\mu_2 < 12$   $K_{ГК}$  становится равным нулю. Таким образом, при использовании в качестве материала колонны слабомагнитной стали с  $\mu_2 < 12$  возможно уменьшение  $K_{ГК}$  до нуля при любых значениях  $b$ .

**Рекомендации по проектированию колонн жилых и общественных зданий.** Выполненные авторами экспериментальные исследования [8] выявили превышение уровня гигиенических норм по ослаблению ГМП в современных зданиях следующих проектов: 1) в каркасных малоэтажных офисных и общественных зданиях со стальными колоннами из труб или швеллеров, которые имеют протяженность  $b = 10-20$ ; 2) в высотных каркасно-монолитных жилых домах с железобетонными колоннами протяженностью  $b = 150-200$ .

Так, для зданий 1-го типа, у которых значение  $b$  попадает в критический диапазон (рис. 5), может быть предложен метод уменьшения  $K_{ГК}$ , заключающийся в разделении колонны на отдельные

фрагменты с  $b = 3$  и последующим их соединением с немагнитными вставками между ними (например, из маломагнитной стали), что позволит уменьшить  $K_{ГК}$  от 2 до 6 раз.

Для зданий 2-го типа, у которых  $b$  не входит в критический диапазон (рис. 5), проблема ослабления ГМП из-за индуктивной намагниченности колонн возникать не должна. Зафиксированное существенное ослабление ГМП здесь может быть связано с нарушением целостности стального каркаса колонн из-за неидеального соединения (сваркой, вязкой проволокой) элементов их арматуры перед бетонированием. Уменьшение интенсивности ослабления ГМП в этом случае возможно путем технологического обеспечения высокой магнитной проводимости в местах соединений отдельных стальных конструктивных элементов колонн большой протяженности в процессе их монтажа.

Альтернативным решением является выполнение как колонн, так и других металлических конструкций каркаса жилых и общественных зданий из слабомагнитной стали с начальной магнитной проницаемостью менее 12, что позволит радикально решить проблему ослабления ГМП в помещениях. Однако для этого требуется организация разработки и рентабельного промышленного производства новой конструкционной стали с уменьшенной на порядок магнитной проницаемостью.

**Заключение.** 1. Разработан аналитический метод расчета магнитоэлектростатического поля для задач с осевой симметрией, предназначенный для моделирования явления ослабления ГМП стальной цилиндрической колонной и основанный на концепции вторичных источников с использованием фиктивных магнитных зарядов, расположенных вне граничной поверхности колонны.

2. Предложена методика оценки интенсивности ослабления ГМП цилиндрической стальной колонной с помощью коэффициента гипогеомагнитности колонны  $K_{ГК}$ , характеризующего объем нормированного относительно радиуса колонны пространства, где ГМП превышает предельный гигиенический уровень.

3. Показано, что значение коэффициента  $K_{ГК}$  цилиндрической колонны нелинейно зависит от коэффициента ее протяженности  $b$  и при граничном значении коэффициента ослабления ГМП равном 0,8 имеет максимум в диапазоне значений  $b$  от 2 до 24, а затем спадает до нуля при  $b > 26$ , что вызвано конкурирующими процессами линейного роста объема ферромагнитных масс колонны и нелинейного снижения коэффициента размагничивания колонны при увеличении  $b$ .

4. Предложен метод уменьшения гипогеомагнитности колонны малой протяженности, заключающийся в разделении колонны на отдельные фрагменты меньшей протяженности с их последующим соединением с немагнитными вставками.

5. Подготовлены рекомендации по проектированию магниточистых колонн жилых и общественных зданий, которые включают: разделение стальных колонн протяженностью  $b$  от 6 до 23 на отдельные фрагменты с  $b \leq 3$  и их последующее соединение с немагнитными вставками, что позволяет уменьшить  $K_{ГК}$  в 2–6 раз; обеспечение высокой магнитной проводимости в местах соединений стальных конструктивных элементов колонн большой протяженности ( $b > 26$ ) при выполнении их монтажа; выполнение колонн из слабомагнитной стали с начальной магнитной проницаемостью менее 12.

1. *Гипогеомагнитные поля в производственных, жилых и общественных зданиях и сооружениях: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.* СанПиН 2.1.8/2.2.4.2489-09 / утв. гл. гос. санитарным врачом РФ 02.03.2009 // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 2009. – № 17. – С. 157–161.

2. *Градиштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. 4-е изд. – М.: Физматгиз, 1963 – 1100 с.

3. *Краснов И.П.* Расчетные методы судового магнетизма и электротехники. – Л.: Судостроение, 1986. – 216 с.

4. *Купрадзе В.Д.* О приближенном решении задач математической физики // Успехи математических наук. – 1967. – Т. 22. – № 2. – С. 59–107.

5. *Нейман Л.Р., Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники: в 2 т. – Л.: Энергия, 1967. – Т. 2. – 401 с.

6. *Походзей Л.В.* Гипогеомагнитные условия как неблагоприятный фактор производственной среды / Дис. ... доктора мед. наук: 14.00.50 – М.: 2004. – 190 с.

7. *Розов В.Ю., Резинкина М.М., Думанский Ю.Д., Гвозденко Л.А.* Исследование техногенных искажений геомагнитного поля в жилых и производственных помещениях и определение путей их снижения до безопасного уровня // Техн. електродинаміка. Темат. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 2. – С. 3–8.

8. *Розов В.Ю., Пелевин Д.Е., Левина С.В.* Экспериментальные исследования явления ослабления статического геомагнитного поля в помещениях // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №6. – С. 70–75.

9. *Сердюк А.М., Григор'єв П.С., Акіменко В.Я., Протас С.В.* Екологічна значущість геомагнітного поля та медично-біологічні передумови гігієнічної регламентації його ослаблення в умовах України // Довкілля і здоров'я. – 2010. – № 3. – С. 8–11.

10. *Стреттон Дж.* Теория электромагнетизма. – М.: Гостехиздат, 1947. – 539 с.

11. *Тозони О.В.* Метод вторичных источников в электротехнике. – М.: Энергия, 1975. – 431 с.

12. *Холодов Ю.А.* Организм и магнитные поля // Успехи физиологических наук. – 1982. – Т.13. – № 2. – С. 48–64.

13. *Яновский Б.М.* Земной магнетизм. – М.-Л.: Изд. ГЛАВСЕВМОРПУТИ, 1941. – 283 с.



14. Karageorghis A., Fairweather G. The method of fundamental solutions for axisymmetric potential problems // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1999. – Vol. 44. – Pp. 1653–1669.
15. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM-2008 – [acting from July 2008]. – Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN, 2008. – 5 p. (<http://www.createhealthyhomes.com/SBM-2008.pdf>).
16. Pryor R.W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach. – Jones & Bartlett Publishers, 2009. – 872 p.

УДК 621.3.013.22

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ОСЛАБЛЕННЯ СТАТИЧНОГО ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ СТАЛЕВОЮ КОЛОНОЮ

**В.Ю.Розов**, чл.-кор. НАН України, **С.Ю.Реуцький**, канд.техн.наук, **С.В.Левіна**

Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів НАН України,

вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна, e-mail: [Rozov@nas.gov.ua](mailto:Rozov@nas.gov.ua)

*Розроблено аналітичний метод розрахунку магнітостатичного поля для задач з осовою симетрією, заснований на концепції вторинних джерел з використанням фіктивних магнітних зарядів, розташованих поза граничною поверхнею ферромагнітного тіла. Запропоновано методику оцінки інтенсивності ослаблення геомагнітного поля (ГМП) сталеву колоною будівлі за допомогою коефіцієнта гіпогеомагнітності, що характеризує об'єм простору поблизу колони, де ГМП перевищує граничний гігієнічний рівень. Показано, що коефіцієнт гіпогеомагнітності колони має максимум при відносній протяжності  $b$  колони від 2 до 24, а потім спадає до нуля при  $b > 26$ , що викликано конкуруючими процесами росту об'єму і зниження коефіцієнта розмагнічування колони при зростанні  $b$ . Підготовлено рекомендації з проектування магніточистих колон будівель, що надають мінімальний вплив на рівень ГМП в житлових і громадських приміщеннях. Бібл. 16, рис. 5.*

**Ключові слова:** статичне магнітне поле, ослаблення геомагнітного поля, сталева колона.

## THE STUDY OF THE EFFECT OF WEAKENING OF STATIC GEOMAGNETIC FIELD BY STEEL COLUMNS

**V.Yu.Rozov, S.Yu.Reutskyi, S.V.Levina**

Science and Technology Center of Magnetism of Technical Objects of NAS of Ukraine,

19 Industrialna st., Kharkiv, 61106, Ukraine, e-mail: [Rozov@nas.gov.ua](mailto:Rozov@nas.gov.ua)

*An analytical method for calculating the magnetostatic field for problems with axial symmetry is developed. It is based on the concept of secondary sources and uses a fictitious magnetic charges located outside the boundary surface of the ferromagnetic body. A technique for estimating the intensity weakening of the geomagnetic field (GMF) by a cylindrical steel column is suggested. The hypogeomagnetic factor which characterizes the volume of space near the column, where the weakening of the GMF exceeds the maximum level of hygiene is introduced. It is shown that the hypogeomagnetic factor of a column has a maximum when the relative length of the column  $b$  changes from 2 to 24. Then it decreases to zero at  $b > 26$ . This is due to the competing processes: the growth of the volume and reduction of demagnetization of the column with the increase of  $b$ . Design Guidelines columns of buildings that have a minimal impact on the level of GMF in their flats and public spaces are presented. References 16, figures 5.*

**Keywords:** static magnetic field, the weakening of the geomagnetic field, the steel column.

1. Hypogeomagnetic field in the industrial, residential and public buildings and facilities: sanitary-epidemiological rules and regulations. SaNPiN 2.1.8/2.2.4.2489-09 / ratified Main State Medical Officer of RF 02.03.2009. // Bulletin normativnykh actov federalnykh ispolnitelnykh organov vlasti. – 2009. – № 17. – Pp. 157–161. (Rus)
2. Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. Tables of integrals, sums, series and products. 4-th ed. – Moskva: Fizmatgiz, 1963 – 1100 p. (Rus)
3. Krasnov I.P. Calculation methods of ship magnetism and electrical engineering. – Leningrad: Sudostroenie, 1986. – 216 p. (Rus)
4. Kupradze V.D. The approximate solution of problems of mathematical physics // Uspekhi Matematicheskikh nauk. – 1967. – Vol. 22. – No. 2. – Pp. 59–107. (Rus)
5. Neimann L.R., Demirchan K.S. Theory of Electrical Engineering: in 2 vol. – Leningrad: Energiia, 1967. – Vol. 2. – 401 p. (Rus)
6. Pokhodzei L.V. Hypogeomagnetic conditions as unfavorable environment factors / Dis. ... Dr. med. Sciences: 14.00.50. – Moskva, 2004. – 190 p. (Rus)
7. Rozov V.Yu., Rezinkina M.M., Dumanskiy Yu.D., Gvozdenko L.A. The study of man-caused distortions in the geomagnetic field of residential and industrial buildings and to identify ways to reduce them to a safe level // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk «Problemy suchasnoi elektrotekhniki». – 2008. – Chapter 2. – Pp. 3–8. (Rus)
8. Rozov V.Yu., Pelevin D.E., Levina S.V. Experimental studies of the phenomenon of weakening the static geomagnetic field in the premises // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – 2013. – No. 6. – Pp. 71–75. (Rus)
9. Serdiuk A.M., Grigoriev P.Ye., Akimenko V.Ya., Protas S.V. Ecological significance of the geomagnetic field and the medical and biological conditions of hygienic regulation of its weakening in Ukraine // Dovkillia i zdorovie. – 2010. – No. 3. – Pp. 8–11. (Ukr)
10. Stretton J.A. The theory of electromagnetism. – Moskva: Gostekhizdat, 1947. – 539 p. (Rus)
11. Tozoni O.V. The method of secondary sources in electrical engineering. – Moskva: Energiia, 1975. – 431 p. (Rus)
12. Holodov Yu.A. The body and the magnetic field // Uspekhi fiziologicheskikh nauk. – 1982. – Vol. 13. – No. 2. – Pp. 48–64. (Rus)
13. Janowskii B.M. Earth's magnetism. – Moskva-Leningrad: Izdatelstvo GLAVSEVMORPUTI, 1941. – 283 p.
14. Karageorghis A., Fairweather G. The method of fundamental solutions for axisymmetric potential problems // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1999. – Vol. 44. – Pp. 1653–1669.
15. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM-2008 – [acting from July 2008]. – Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN, 2008. – 5 p. (<http://www.createhealthyhomes.com/SBM-2008.pdf>).
16. Pryor R.W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach. – Jones & Bartlett Publishers, 2009. – 872 p.

Надійшла 25.06.2013

Received 25.06.2013