

УДК 550.382.7

В. Рябенський, д-р техн. наук, проф.,

E-mail: optron2@gmail.com,

І. Чудайкін, канд. техн. наук,

E-mail: igorlu3141509@rambler.ru,

Ю. Таргунакова, асп., E-mail: golubkajulya@gmail.com

тел. (0512) 44-16-49

Національний Університет Кораблебудування ім. адмірала Макарова
Інститут автоматики та електротехніки, кафедра теоретичної електротехніки
та електронних систем, пр. Центральний, 3, м. Миколаїв, 54021, Україна

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ МОДЕЛЮВАННЯ КВАЗІСТАЦІОНАРНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М.І. Орлюком)

Магнітометричний розділ геофізики морських акваторій характеризується переходом на якісно новий рівень досліджень. Магнітометричні вимірювання використовуються при виконанні спеціалізованих завдань: трасування трубопроводів, пошук затонулих суден, авіабомб і підземних снарядів, що не розірвалися, виявлення і вивчення затонулих об'єктів культурної спадщини. Ідентифікація таких затонулих об'єктів називається оберненою задачею морської магнітометрії, і вона належить до класу некоректно поставлених задач. Першим етапом розв'язання такої задачі є розв'язання прямої задачі, яка полягає у визначенні аномального поля, створюваного тілами певної форми, густини за певних умов занурення і накопичення інформації про ці об'єкти. Особливий інтерес становлять задачі визначення аномального поля об'єктів, що складаються з тонкостінних конструкцій. Розв'язання ж цієї проблеми багато в чому визначається наявністю ефективної системи програм з вирішення тривимірних прямих задач магнітометрії – знаходження полів типових збуджувальних тіл (наборами яких можна апроксимувати реальні об'єкти). У статті описується робота головного алгоритму та підпрограм, які входять до головного алгоритму розробленого програмного комплексу MBEM для моделювання магнітних полів тонкостінних конструкцій. MBEM створено на основі розробленого модифікованого методу граничних елементів, який базується на класичному методі граничних елементів та методі вторинних джерел. Здійснено чисельну перевірку та встановлено ефективність розроблених алгоритмів і програмних компонентів на задачах розрахунку магнітного поля тонкостінних конструкцій, для яких відомі розв'язки. Наведено приклад роботи програмного комплексу – розрахунок результуючого поля тонкостінної труби, а саме моделювання вектора напруженості на площині, яка знаходиться під об'єктом на відстані півметра.

Ключові слова: магнітне поле, вектор магнітної напруженості, модифікований метод граничних елементів, комплекс MBEM, тонкостінні конструкції.

На сьогодні дослідження підводної частини водних акваторій характеризується переходом на якісно новий рівень. Особлива увага при проведенні пошукових робіт приділяється геофізичним методам, у тому числі й магнітометрії (Владов та Старовойтов, 1998; Орлюк та ін., 2014; Старинов, 2014). Визначальну роль у розвитку теорії і практики сучасних морських магнітометричних досліджень відіграють такі чинники: поява вимірювальної апаратури, що забезпечує високу точність спостережень; вдосконалення методики виконання магнітостатичних спостережень; акумуляція знань і практичних результатів, і глибока проробка на їхній основі теорії й методології інтерпретації магнітометричних даних; стрімке збільшення продуктивності обчислювальної техніки та створення ефективних інформаційних технологій зберігання, обробки та інтерпретації цифрової інформації (Кортунов та ін., 2007; Манштейн, 2002). Магнітометричні вимірювання використовуються широким колом наукових і виробничих організацій при вирішенні спеціалізованих завдань: трасування трубопроводів (Крапивський та Некучаєв, 2011; Zhao et al., 2014), пошук затонулих суден (Holmes, 2008), авіабомб і підземних снарядів, що не розірвалися (Звенижский та Парфенцев, 2008; Holmes, 2006), виявлення і вивчення затонулих об'єктів культурної спадщини, вивчення магнітних полів металоконструкцій (Сердюк та ін., 2010; Розов та ін., 2008; Розов та ін., 2014; Розов та ін., 2013). Ідентифікація таких затонулих об'єктів називається оберненою задачею морської магнітометрії, і вона належить до класу некоректно поставлених задач. Рішення оберненої задачі передбачає визначення форми і розташування тіл, їхньої густини та об'єму (Тафеев, 1953). Виконання цього складного завдання зазвичай проводиться у декілька етапів.

Першим етапом розв'язання такої задачі є розв'язання прямої задачі. Пряма задача полягає у визначенні аномального поля, створюваного тілами певної форми, густини за певних умов занурення і накопичення інформації про ці об'єкти (Завойський, 1978). Особливий інтерес становлять задачі визначення аномального поля

об'єктів, що складаються з тонкостінних конструкцій (Краснов, 1986; Хайруллин, 2012). Розв'язання ж цієї проблеми багато в чому визначається наявністю ефективної системи програм з вирішення тривимірних прямих задач магнітометрії — знаходження полів типових збуджувальних тіл (наборами яких можна апроксимувати реальні об'єкти) (Буличов та ін., 2010).

Загалом алгоритми розрахунку прямих задач магнітометрії поділяються на категорії:

1. Використання і подальша модернізація існуючих аналітичних формул (цей метод дозволяє отримати явний розв'язок тільки для областей найпростішого виду).

2. Створення високоефективних швидких наближених чисельних методів, заснованих на застосуванні обчислювальної техніки.

Багато методів розв'язання обернених задач базуються, у тому чи іншому вигляді, на методах підбору, що вимагає багаторазового застосування алгоритму розв'язання прямої задачі. Це диктує необхідність того, щоб ці алгоритми були стійкі до обчислювальних помилок і на порядок-два більш швидкодіючими, ніж процедури відповідних алгоритмів багатовимірної оптимізації (Єрмохин, 1998).

Із численних методів морської магнітометрії найбільш успішно застосовуються методи інтегральних рівнянь (Блох, 2009). При їхній розробці найбільша увага приділялася пошуково-розвідувальній геофізиці великих родовищ, які глибоко залягають, де досить часто можна користуватися квазідвовимірними наближеннями. Також для цих методів слабо розвинена комп'ютерна база для розв'язання тривимірних задач. Тому в моделюванні індукованого магнітного поля тонкостінних конструкцій у тривимірному просторі є серйозний пробіл. Нині посилено розвиваються інженерно-пошукові, археологічні та екологічні роботи, у яких обсяг цифрової інформації та ступінь необхідної деталізації вимагають не просто комп'ютерної обробки, але переходу до моделювання реальної тривимірної картини досліджуваного об'єкта. Тим часом обчислювальні можливості сучасних комп'ютерів

уже дозволяють перевести цілий ряд завдань моделювання тривимірних середовищ з чисто наукової у практичну площину.

Для розрахунку електромагнітних полів тепер найбільш широко застосовуються: метод скінченних різниць (МСР); метод скінченних елементів (МСЕ); метод граничних елементів (МГЕ).

А.В. Пашковський у своїй роботі (*Пашковський, 2014*) навів класифікацію методів розв'язку польових задач. Цю класифікацію, яку було розширено й доповнено, подано в роботі (*Рябенський та ін., 2017*). На сьогодні понад 90% сучасних інженерних програм розрахунку ґрунтуються на методі скінченних елементів. Однак у МСЕ (*Косиченко, 2013*) існує ще цілий ряд істотних недоліків – штучне обмеження області розрахунку, дискретизація навролишнього простору, виконання нової дискретизації при зміні положення елементів тощо, що привело до пошуків альтернативних методів, із яких найбільш перспективним є МГЕ.

Дж. Т. Кацикаделіс у своїй книзі (*Katsikadelis, 2017*) описав переваги й недоліки МГЕ. *Перевагами* методу є: 1. Дискретизації підлягає тільки межа тіла, що полегшує чисельне моделювання за допомогою МГЕ і на порядок зменшує число невідомих. Таким чином, спрощується і зміна моделі, пов'язана з урахуванням змін проекту. 2. МГЕ дозволяє обчислювати розв'язок та його похідні в будь-якій точці розглянутої області та в будь-який момент часу. Це можливо тому, що метод використовує інтегральне представлення розв'язку отриманого аналітичного виразу, яке можна диференціювати й використовувати як аналітичну формулу. Це неможливо при використанні МСЕ, оскільки розв'язок можна отримати тільки у вузлових точках. 3. Метод дуже ефективний для обчислень похідних польових функцій. Можна з легкістю оперувати зосередженими силами й моментами як в області, так і на її межі. На поточній стадії розвитку МГЕ можна виділити наступні *недоліки* методу: 1. Чисельна реалізація МГЕ призводить до системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), у яких матриці коефіцієнтів повністю заповнені й несиметричні. При використанні МСЕ отримані матриці мають стрічкову структуру. Однак указаний недолік МГЕ компенсується значно меншою розмірністю матриць. 2. Застосування МГЕ вимагає наявності фундаментальної матриці розв'язків. Для побудови граничних елементів треба мати функцію Гріна для відповідної області. Такі функції знайдені для областей, які мають просту форму. Цей метод не може використовуватися для задач, фундаментальний розв'язок яких не відомий чи не визначений. 3. Розроблені програми та підпрограми на базі МГЕ носять локальний характер і були створені лише для розв'язання конкретних задач у досліджуваній області, без особливих засобів візуалізації та повної автоматизації, що свідчить про необхідність розробки нової САПР, яка відповідає всім сучасним вимогам.

Недолік, описаний у пункті 2, можна усунути за допомогою створення комбінованого методу граничних елементів і методу вторинних джерел. Д.М. Філіппов у своїй роботі (*Філіппов, 2013*) розвив метод вторинних джерел для моделювання двовимірного магнітного поля електромагнітних систем, в якому при складанні СЛАР для знаходження густини вторинних джерел вперше запропоновано застосовувати інтегральні закони поля до елементів межі розділу середовищ.

Задача про намагнічення тонких оболонок і пластин являє собою специфічний граничний випадок загальної магнітостатичної задачі, що заслуговує самостійного розгляду (*Краснов, 1986*). Особливості цієї задачі полягають у тому, що мала, порівняно з іншими геометричними розмірами, товщина оболонки обумовлює появу в рішенні задачі різниці близьких величин. Тому необхідно шукати

такий шлях виконання завдання, за якого умова малості товщини враховувалася б вже у самому формулюванні задачі. У зв'язку з цим авторами запропонованої статті було розроблено модифікований метод граничних елементів (ММГЕ) для дослідження магнітних полів тонкостінних конструкцій у тривимірному просторі, який засновано на методі граничних елементів та вторинних джерел.

Постановка задачі. За допомогою розробленого ММГЕ розробити алгоритми та програмні компоненти для моделювання магнітних полів тонкостінних конструкцій у тривимірному просторі для розрахунку прямих задач магнітометрії. Також слід зазначити, що розроблений ММГЕ позбавлений недоліку класичного методу граничних елементів, а саме: для побудови класичних граничних елементів треба мати функцію Гріна для відповідної області, такі функції знайдені не для всіх можливих областей (*Katsikadelis, 2016*).

На базі розробленого ММГЕ було створено програмний комплекс MBEM для розрахунку магнітних полів. Цей програмний комплекс має дружній інтерфейс, реалізований на операційній системі Linux, з використанням *gmsh* (*Гезуїєн та Ремаль, 2017*) та *ani3d* (*Данилов, 2010*) генераторів та бібліотеки GNU GSL за допомогою C та C++ мов програмування.

Програмний комплекс приймає вхідні параметри, які задає користувач. Сам користувач вибирає за допомогою яких сіткових генераторів (*gmsh* чи *ani3d*) виконати побудову поверхневої сітки та куди вивести результати розрахунку: візуалізувати результати програми за допомогою *gmsh* чи вивести їх у файл. Також розроблений комплекс програм дозволяє створити довільний об'єкт в інтерактивному режимі чи завантажити вже існуючий об'єкт; побудувати розрахункову сітку та вивести її на монітор (якщо сітка не підійшла, то можна з легкістю поміняти вхідні параметри триангуляції та розрахувати нову сітку); після побудовання сітки розраховується ППШ і виводиться результат розрахунку індукованого магнітного потенціалу та напруженості у вигляді графіків і векторів.

Головний алгоритм програмного комплексу зображено на рис. 1.

Розглянемо докладніше роботу підпрограм, які входять у головний алгоритм програмного комплексу:

- **Триангуляція поверхні заданого об'єкта:** будується поверхнева конформна триангуляція області за допомогою портативних бібліотек *ani3d* чи *gmsh* (за вибором користувача). Вхідна інформація: параметри об'єкта, крок триангуляції, алгоритм розбиття сітки (фронтальний алгоритм, алгоритм Делоне, *MeshAdapt* алгоритм (доступний тільки в *gmsh*)). Для складних кривих поверхонь розробники програмного забезпечення *gmsh* (*Рябенський та др., 2017*) рекомендують використовувати *MeshAdapt* алгоритм. Коли важлива висока якість елементів – краще використовувати фронтальний алгоритм. Для побудови великих поверхневих сіток є більш оптимальним алгоритм, заснований на триангуляції Делоне. Після отримання початкової поверхневої триангуляції, до отриманої сітки можна застосувати пост-оптимізацію, яка дозволяє значно поліпшити її рівномірність та виправити певні нерегулярності. Критерій рівномірності при цьому може бути іншим, ніж за початкової триангуляції. Також для згладжування трикутної сітки й отримання практично рівносторонніх трикутників можна застосувати алгоритм Ллойда. На відміну від інших методів згладжування, наприклад, від згладжування Лапласа (при якому вузли зміщуються таким чином, що кожен внутрішній вузол опиняється у центрі мас тіла, утвореного сусідніми вершинами), алгоритм Ллойда може змінити топологію мережі, що викликає приведення до майже рівносторонніх

елементів, і уникнути проблем зі змішуванням, які можуть виникнути при використанні згладжування Лапласа. Інформація з даними про триангуляцію (кількість точок розбиття nV , їхні координати, кількість трикутників та номери вершин, які входять у кожен трикутник (масив

faces)) записуються у файл, який має розширення ".out" (якщо користувач вибрав *api3d*) чи ".msh" (якщо користувач вибрав *gms*).

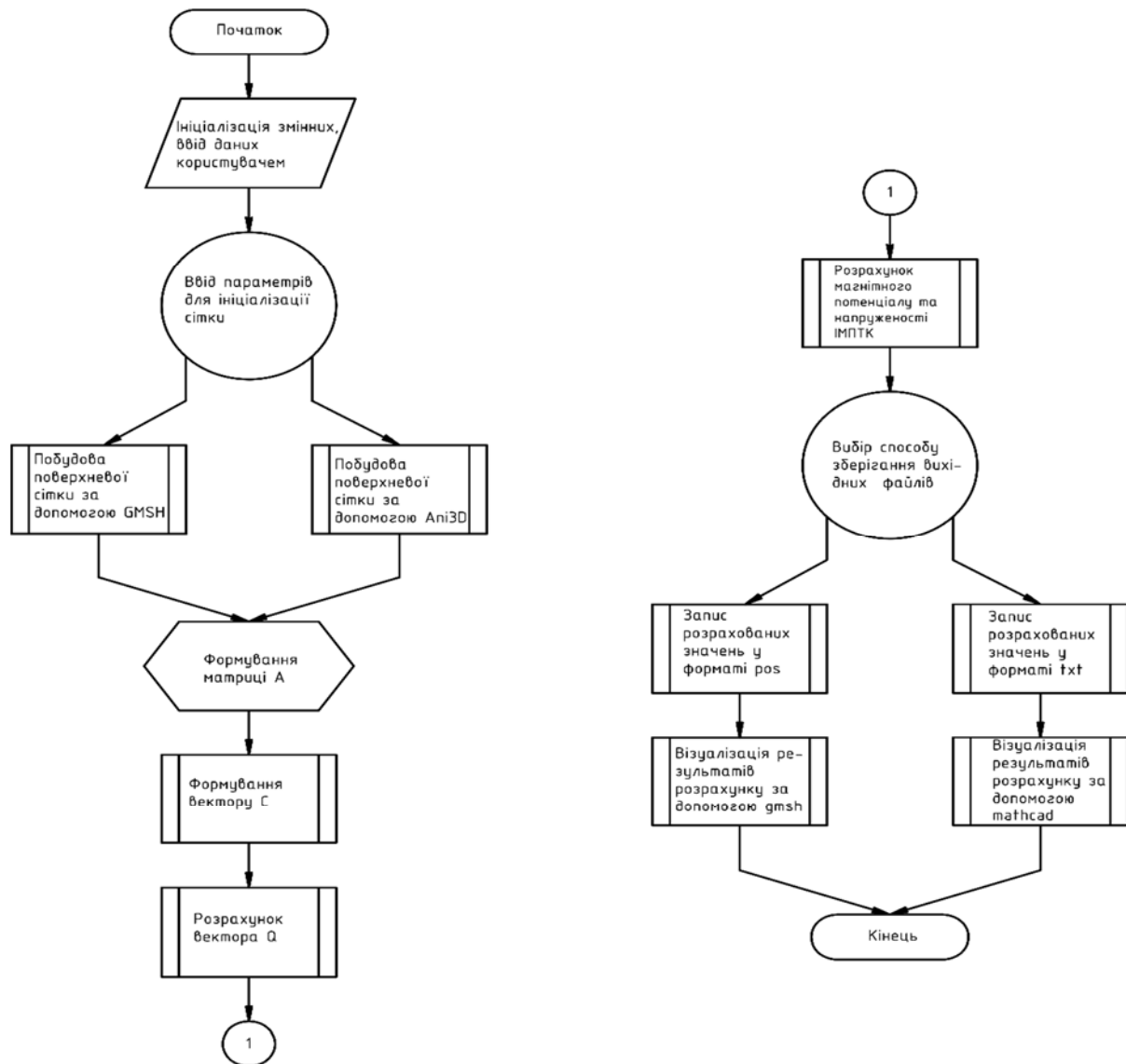


Рис. 1. Головний алгоритм МВЕМ

- **Зчитування та формування масивів для обробки результатів триангуляції.**
- **Формування матриці A .** Елементи матриці a_{ij} – це коефіцієнти впливу, які розраховуються в кожній j -тій

точці поверхні триангуляції та відображають вплив від цієї точки на інші i -ті точки (рис. 2, а). Вони розраховуються за формулою (1).

$$a_{ij} = -\frac{1}{4\pi \cdot S_j} \sum_{k=1}^{P_j} \sum_{i=1}^2 \mu_s^*(t_{jkl}) l_{jkl} \frac{(x_{jkl} - x_i) \cos n_{jklx} + (y_{jkl} - y_i) \cos n_{jkly} + (z_{jkl} - z_i) \cos n_{jklz}}{\sqrt{(x_{jkl} - x_i)^2 + (y_{jkl} - y_i)^2 + (z_{jkl} - z_i)^2}} \quad (1)$$

де n_{jkl} – зовнішня нормаль до контрольного об'єму, що знаходиться у площині Δ_{jk} ; n_{jklx} , n_{jkly} , n_{jklz} – кути між n_{jkl} та координатними осями.

Координати вектора n_{jkl} (n_{j11} , n_{j12} рис. 2, б) розраховуються за формулою:

$$\bar{n}_{jkl} = \bar{l}_{jkl} \times \bar{n}_{jk} \quad (2)$$

де n_{jk} – зовнішня нормаль до ділянки тонкостінної поверхні:

$$\bar{n}_{jk} = \bar{r}_{jk1} \times \bar{r}_{jk2} \quad (3)$$

У даній підпрограмі для розрахунку коефіцієнтів впливу a_{ij} була застосована багатонитевість.

- **Формування вектора C .** Елементи вектора c_j – коефіцієнти впливу фоновго поля на j -ту точку поверхні, розраховуються по формулі (4)

$$c_j = \frac{1}{S_j} \sum_{k=1}^{P_j} \sum_{i=1}^2 \mu_s^*(t_{jkl}) l_{jkl} [H_0 \cos n_{jklx} + H_0 \cos n_{jkly} + H_0 \cos n_{jklz}] \quad (4)$$

• Розрахунок інтенсивності точкових джерел Q (знаходження потенціалу простого шару (ППШ) тонкостінної конструкції).

Для знаходження ППШ складається система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР):

$$[A]\{Q\} = \{C\} \quad (5)$$

У СЛАР (5) матриця $[A]$ є виродженою. Для її розв'язку застосовується сингулярне розкладання.

Після сингулярного розкладання матриця $[A]$ матиме вигляд:

$$[A] = [U][S][V]^T \quad (6)$$

де $[S]$ – матриця такого ж розміру, як $[A]$, у якій елементи, розташовані на головній діагоналі, є сингулярними числами (а всі елементи, що не лежать на головній діагоналі, є нульовими); $[U]$ та $[V]$ – це дві унітарні матриці, що складаються з лівих та правих сингулярних векторів відповідно.

Після сингулярного розкладання отримана СЛАР розв'язується методом найменших квадратів.

Знаючи значення потенціалу простого шару, можна з легкістю знайти індуковане поле у будь-якій точці простору (скалярний магнітний потенціал (7) і вектор магнітної напруженості (8)):

$$\phi_m = \Psi_m(t, q_i) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{P_j} \frac{Q_i}{\sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2 + (z_t - z_i)^2}} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{mx} &= -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{P_j} \frac{Q_j (x_t - x_i)}{\sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2 + (z_t - z_i)^2}} \\ H_{my} &= -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{P_j} \frac{Q_j (y_t - y_i)}{\sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2 + (z_t - z_i)^2}} \\ H_{mz} &= -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{P_j} \frac{Q_j (z_t - z_i)}{\sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2 + (z_t - z_i)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Розглянемо роботу розробленого програмного комплексу MBEM на прикладі.

Розрахуємо магнітну індукцію залізної труби: зовнішній радіус $r_1 = 1.55 \text{ м}$, внутрішній радіус $r_2 = 1.45$, довжина труби $l = 30 \text{ м}$, магнітна проникність заліза $\mu = 400$. Труба знаходиться у зовнішньому полі $H_{0z} = 1 \text{ А/м}$. Вісь труби збігається з віссю y . Центр труби збігається з початком координат.

На рис. 3 представлено значення результуючої магнітної напруженості, одержаної у MBEM (справа) та в ANSYS (зліва) на відрітку, який розташований під трубою на відстані 1,25 м від неї. Відрізок має наступні координати: $-5 \leq x \leq 5$, $y = 0$, $z = 0$. Порівняємо результати розрахунку, отримані в розробленому програмному комплексі MBEM та в програмному комплексі ANSYS.

На рис. 4 наведено значення вектора напруженості на площині з координатами $-5 \leq x \leq 5$, $-5 \leq y \leq 5$, $z = -2$ (вид збоку), розраховане в розробленому програмному комплексі MBEM.

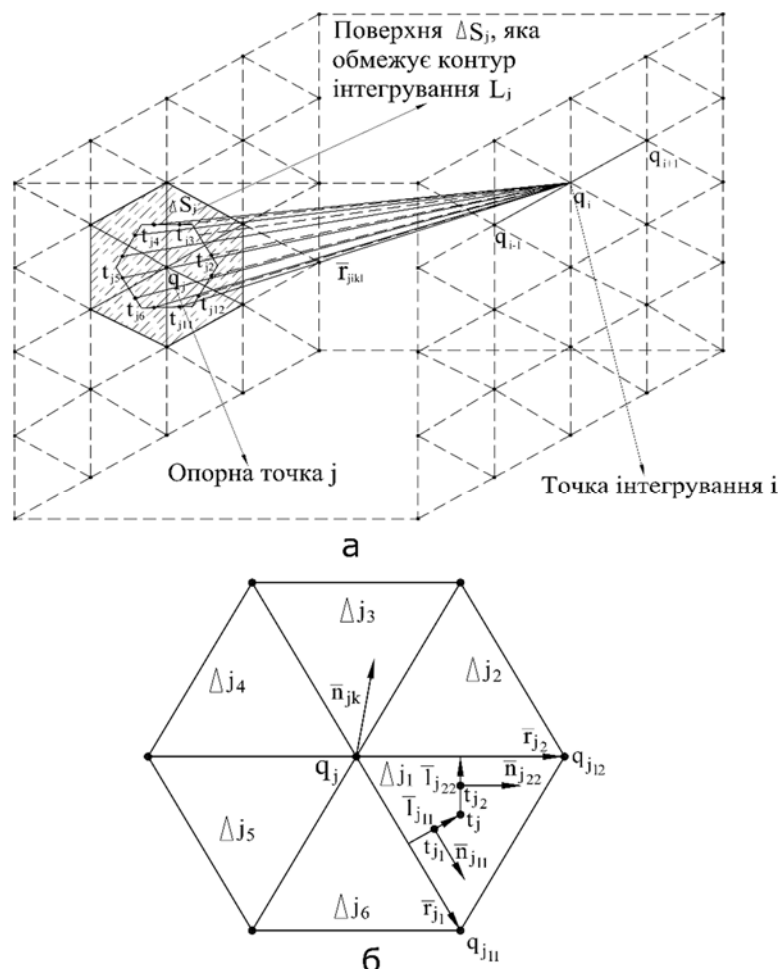


Рис. 2. Апроксимація тривимірної поверхні при розрахунку коефіцієнтів впливу

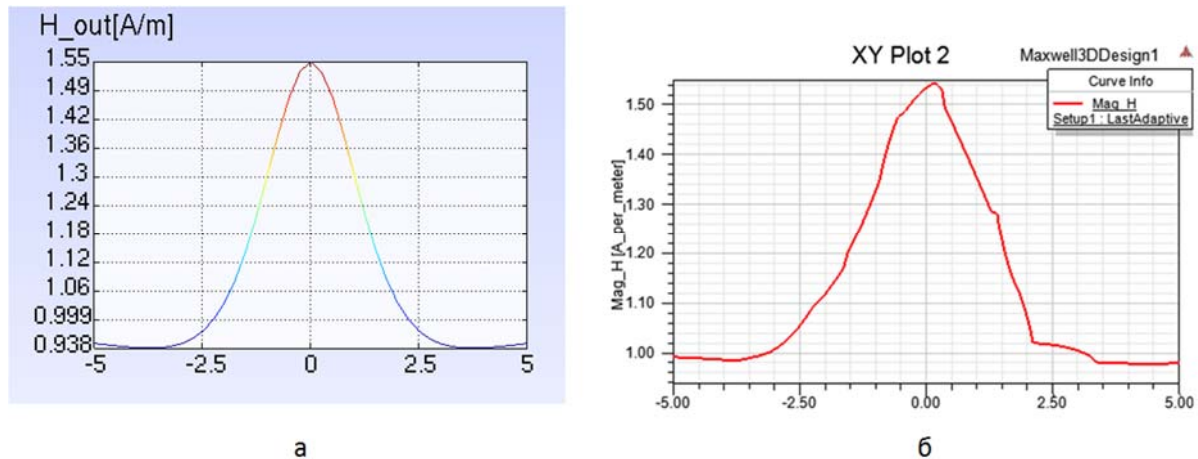


Рис. 2. Значення результуючої магнітної напруженості на відрітку, який знаходиться під тонкостінною конструкцією, розраховані в MBEM(a) та в ANSYS(b)

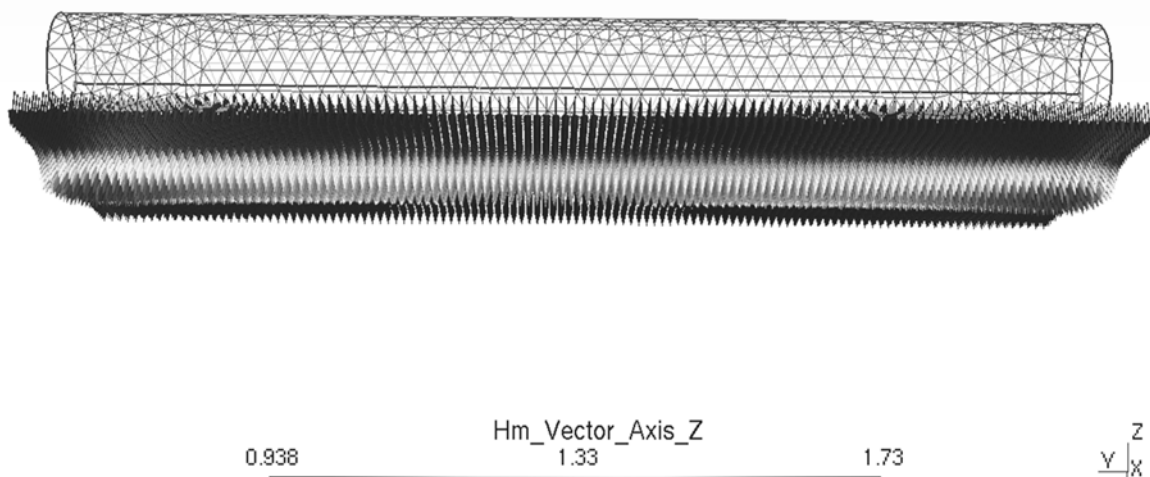


Рис. 3. Розподіл результуючого вектора напруженості на площині з координатами $-5 \leq x \leq 5$, $-5 \leq y \leq 5$, $z = -2$

Висновки. За допомогою розробленого ММГЕ розроблено алгоритми та програмний комплекс МВЕМ для моделювання магнітних полів тонкостінних конструкцій у тривимірному просторі для розрахунку прямих задач магнітометрії.

Цей комплекс дозволяє моделювати основні ймовірнісні характеристики знаходження затонулих об'єктів, на підставі яких розробляється стратегія проведення експериментальних досліджень. ММГЕ базується на методі граничних елементів (МГЕ) і методі вторинних джерел, але, на відміну від класичного МГЕ, не вимагає наявності матриці фундаментальних розв'язків. Застосування ММГЕ дозволяє розрахувати магнітне поле у тривимірному просторі поблизу та всередині тонкостінної оболонки будь-якої конфігурації, при цьому зменшується розмірність дискретної моделі порівняно з МСЕ та МСР.

Розроблений програмний комплекс МВЕМ має дружній інтерфейс, який реалізовано на операційній системі Linux із використанням gmsh та ani3d генераторів за допомогою C та C++ мов програмування, та працює в багатонитевому режимі.

Список використаних джерел

1. Блох, Ю.И. (2009). Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-interp.pdf>
2. Булычев, А.А., Лыгин, И.В., Мелихов, В.Р. (2010). Численные методы решения прямых задач гравитационной и магниторазведки. Москва: Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова.

3. Владов, М.Л., Старовойтов, А.В. (1998). Обзор геофизических методов исследований при решении инженерно-геологических и инженерных задач. Москва: ГСД Продакшен.
4. Гезуейн, К., Ремаль, Ж.-Ф. (2017). Инструкция користувача Gmsh. <http://gmsh.info/doc/texinfo/gmsh.html>
5. Данилов, А.А. (2010). Способы построения трёхмерных поверхностных триангуляций и тетраэдральных сеток. *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*, Т. 65, 1, 87-92.
6. Ермохин, К.М. (1998). Решение трехмерных задач детальной электро- и магниторазведки на основе метода объемных дипольных источников. *Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 04.00.12*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет.
7. Завойский, В.Н. (1978). Вычисление магнитных полей анизотропных трехмерных тел в задачах магниторазведки. *Известия АН СССР. Физика Земли*, 1, 76-85.
8. Звенижский, С.С., Парфенцев, И.В. (2008). Метод магнитометрического обнаружения взрывоопасных предметов. *Спецтехника и связь*, 2, 8-17.
9. Кортуннов, В.А., Кулинич, Р.Г., Сычева, Е.И. (2007). Геофизические поля окраинных морей и океана. Владивосток: ДВГТУ.
10. Косиченко, М.Ю. (2003). Численное моделирование двумерных стационарных электромагнитных полей в электромагнитных и магнитостатических системах комбинированным методом конечных и граничных элементов. *Автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.09.05*. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова.
11. Крапивский, Е.И., Некучаев, В.О. (2011). Дистанционная магнитометрия газонефтепроводов. Ухта: Изд. УГТУ.
12. Краснов, И.П. (1986). Расчетные методы судового магнетизма и электротехники. Ленинград: Судостроение.
13. Манштейн, А.К. (2002). Малоглубинная геофизика. Новосибирск: Изд-во НГУ.
14. Орлюк, М.И., Марченко, М.И., Иващенко, И.Н. (2014). Расчет компонент геомагнитного поля на примере одесской магнитной аномалии. *Геодинамика*, 1(16), 96-102.

15. Орлюк, М. И., Роменец, А.А., Марченко, А.В., Орлюк, И.М., Иващенко, И.Н. (2015). Магнитное склонение на территории Украины: результаты наблюдений и вычислений. *Геофизический журнал*, 2(37), 73-85.
16. Пашковский, А.В. (2014). Численно-аналитические методы стандартных элементов для моделирования стационарных физических полей в линейных кусочно-однородных и нелинейных средах. *Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.18*. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова.
17. Розов, В. Ю., Завальный, А. В., Золотов, С.М., Грецих, С. В. (2015). Методы нормализации статистического геомагнитного поля в жилых домах. *Электротехника и электромеханика*, 2, 35-40.
18. Розов, В. Ю., Левина, С. В. (2014). Моделирование статического геомагнитного поля внутри помещений современных жилых домов. *Технічна електродинаміка*, 4, 8-10.
19. Розов, В. Ю., Пелевин, Д. Е., Левина, С. В. (2013). Экспериментальные исследования явления ослабления статического геомагнитного поля в помещениях. *Электротехника и электромеханика*, 6, 72-76.
20. Розов, В.Ю., Резинкина, М. М., Думанский, Ю. Д., Гвозденко, Ю. Д. (2008). Исследование техногенных искажений геомагнитного поля в жилых и производственных помещениях и определение путей их снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки"*, Ч. 2., 3-8.
21. Рябенкий, В.М., Чудайкин, I.I., Таргунакова, Ю. Д. (2017). Модифікований метод граничних елементів та алгоритм розв'язання задач обчислення індукованого магнітного поля тонкостінних конструкцій в тривимірному просторі. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання"*, 403-409. ISBN: 978-617-7468-02-7.
22. Рябенкий, В. М., Чудайкин, И. И., Таргунакова, Ю. Д. (2017). Методы генерации треугольной сетки для решения задач методом граничных элементов. *Мат. доп. Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та молодих вчених "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці"*, 356-357.
23. Сердюк, А.М., Григор'єв, П.Є., Акіменко, В.Я., Протас, С.В. (2010). Екологічна значущість геомагнітного поля та медично-біологічні передумови гігієнічної регламентації його ослаблення в умовах України. *Довкілля і здоров'я*, 3, 8-11.
24. Стариков, В.С. (2016). Инженерная магнитометрия при исследовании технического состояния стальных трубопроводов большого диаметра. *Вестник ВГУ. Серия: Геология*, 3, 114-118.
25. Тафеев, Ю.П. (1953). О расчетах магнитного поля ΔT . В кн. *Геофизическая разведка рудных месторождений*. Госгеоліздат, 76-81.
26. Филиппов, Д.М. (2013). Развитие метода вторичных источников для моделирования плоскопараллельного магнитного поля электромагнитных систем. *Автореф. дис. ... к-та техн. наук : 05.09.05*. Харьков: Таврический национальный университет имени В.И. Вернадского.
27. Хайруллин, Ф.С. (2012). Расчет тонкостенных конструкций сложной формы на основе аппроксимирующих функций с конечными носителями: монография. Казань: КНИТУ. ISBN: 978-5-7882-1335-4.
28. Holmes, J.J. (2006). Exploitation of A Ship's Magnetic Field Signatures. Arizona: Morgan & Claypool Publishers. <https://doi.org/10.2200/S00034ED1V01Y200605CEM009>
29. Holmes, J.J. (2008). Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures. Arizona: Morgan & Claypool Publishers. <https://doi.org/10.2200/S00150ED1V01Y200809CEM023>
30. Katsikadelis, J.T. (2016). The Boundary Element Method for Engineers and Scientists 2nd Edition. Oxford: Academic Press. ISBN: 978012802104
31. Zhao, W., Huang, X., Chen, S., Zeng, Z., Jin, S. (2014). A detection system for pipeline direction based on shielded geomagnetic field. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 10-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.11.001>.
7. Hayrullin, F.S. (2012). Raschet tonkostennykh konstruktsey slozhnoy formy na osnove approksimiruyuschih funktsiy s konechnymi nositeliymi. Kazan: KNIU. [in Russian]
8. Holmes, J.J. (2006). Exploitation of A Ship's Magnetic Field Signatures. Arizona: Morgan & Claypool Publishers. <https://doi.org/10.2200/S00034ED1V01Y200605CEM009>
9. Holmes, J.J. (2008). Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures. Arizona: Morgan & Claypool Publishers. <https://doi.org/10.2200/S00150ED1V01Y200809CEM023>
10. Katsikadelis, J.T. (2016) The boundary element method for engineers and scientists : theory and applications. London : Academic Press.
11. Kortunov, V.A., Kulnich, R.G. & Syicheva, E.I. (2007). Geofizicheskie polya okrainnykh morey i okeana. Vladivostok: DVGU. [in Russian]
12. Kosichenko, M.Yu. (2003). Chislennoe modelirovanie dvumernykh statsionarnykh elektromagnitnykh poley v elektromagnitnykh i magnitostatsicheskikh sistemah kombinirovannyim metodom konechnykh i granichnykh elementov. Extended abstract of candidate's thesis (Theoretical electrical engineering). Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk. [in Russian]
13. Krapivskiy, E.I., Nekuchaev V.O. (2011). Distantcionnaya magnitometriya gazonefteprovodov. Ukhta: Ed. USTU. [in Russian]
14. Krasnov, I.P. (1986). Raschetnyye metodyi sudovogo magnetizma i elektrotehniki. Leningrad: Sudostroenie. [in Russian]
15. Manshteyn, A.K. (2002). Maloglubinnaya geofizika. Novosibirsk: Izd-vo NGU. [in Russian]
16. Orlyuk, M.I., Marchenko, A.V., Ivaschenko, I.N. (2014). Calculation of the geomagnetic field induction vector components on the Odessa magnetic anomaly region. *Geodynamics*, 1, 96-102. [in Russian]
17. Orlyuk, M.I., Romenets, A.A., Marchenko, A.V., Orliuk, I.M., Ivashchenko, I.N. (2015). Magnetic declination in the territory of Ukraine: the results of observations and calculations. *Geophysical Journal*, 2(37), 73-85. [in Russian]
18. Pashkovskiy, A.V. (2014). Chislennno-analiticheskie metodyi standartnykh elementov dlya modelirovaniya statsionarnykh fizicheskikh poley v lineynykh kusochno-odnorodnykh i nelineynykh sredah. Extended abstract of Doctor's thesis (Mathematical modeling, numerical methods and program complexes). Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk. [in Russian]
19. Rozov, V.Yu., Levina S.V. (2014). Modeling of the static geomagnetic field indoor dwelling houses. *Technical electrodynamics*, 4, 8-10. [in Russian]
20. Rozov, V.Yu., Pelevin, D.Ye., Levina, S.V. (2013). Experimental research into indoor static geomagnetic field weakening phenomenon. *Electrical engineering & electromechanics*, 6, 72-76. [in Russian]
21. Rozov, V. Yu., Rezinkina, M. M., Dumanskiy, Yu. D., Gvozdenko, L. A. (2008) 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. Tematichnyy vypusk "Problemy suchasnoyi elektrotehniki"*, 2, 3-8. [in Russian]
22. Rozov, V.Yu., Zavalnyi, A.V., Zolotov, S.M., Gretsikh, S.V. (2015). The normalization methods of the static geomagnetic field inside houses. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2, 35-40. [in Russian]
23. Ryabenkiy, V., Chudaykin, I., Targunakova, Yu. (2017). Modified Boundary Elements Method and algorithm for solving problems of the thin structures induced fields in a three dimensional space. *Proceedings of the International Scientific Conference. Information Technologies and Computer Modelling*, 403-409. [in Ukrainian]
24. Ryabenkiy, V., Chudaykin, I., Targunakova, Yu. (2017). Metodyi generatsii treugolnoy setki dlya resheniya zadach metodom granichnykh elementov. *Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists Innovations in Shipbuilding and Ocean Engineering*, 356-357. [in Ukrainian]
25. Serduk, A.M., Grigor'ev, P. Ye., Akimenko, V. Y., Protas S. V. (2010). Ecological significance of the geomagnetic field and the medical and biological conditions of hygienic regulation of its weakening in Ukraine. *Environment and Health*, 3, 8-11. [in Ukrainian]
26. Starikov, V.S. (2016). Engineering magnetometry in the study of technical state of large diameter steel pipelines. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 3, 114-118. [in Russian]
27. Tafeyev, Yu.P. (1953) O raschetah magnitnogo polya. In *Geofizicheskaya razvedka rudnykh mestorozhdeniy*. Gosgeolizdat, 76-81. [in Russian]
28. Vladov, M. L., Starovoytov, A. V. (1998). Obzor geofizicheskikh metodov issledovaniy pri reshenii inzhenerno-geologicheskikh i inzhenernykh zadach. Moscow: GSD Production. [in Russian]
29. Zavoytskiy, V.N. (1978). Vyichisleniye magnitnykh poley anizotropnykh trehmernykh tel v zadachah magnitorazvedki. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, 1, 76-85. [in Russian]
30. Zhao, W., Huang, X., Chen, S., Zeng, Z., Jin, S. (2014). A detection system for pipeline direction based on shielded geomagnetic field. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 10-14.
31. Zvenizhskiy, S.S., Parfentsev, I.V. (2008). Metod magnitometricheskogo obnaruzheniya vzryivoopasnykh predmetov. *Spetsstehnika i svyaz*, 2, 8-17. [in Russian]

Надійшла до редколегії 24.01.18

V. Ryabenkiy, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
E-mail: optron2@gmail.com
I. Chudaykin, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
E-mail: igorlu3141509@rambler.ru
J. Targunakova, PhD student,
E-mail: golubkajulya@gmail.com
Theoretical Electronic and Electronic Systems Department
Admiral Makarov National University of the Shipbuilding
3 Central Ave., Mykolaiv, 54021, Ukraine

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS AND SOFTWARE COMPONENTS OF QUASI-STATIONARY MAGNETIC FIELDS MODELING

The magnetometric section of the marine areas geophysics is characterized by the transition to a qualitatively new level of research, pipeline tracing, search for sunken ships, aerial bombs and unexploded ordnance, study of sunken objects of cultural heritage, identification of such sunken objects (inverse magnetometry problem), etc. The identification of such objects is called the inverse problem of marine magnetometry, and it belongs to the class of incorrectly posed task. The first step in solving this task is to find solution of the direct problem. A direct problem is to determine the anomalous field created by objects of a certain shape, density under certain conditions of immersion and accumulation of information about these objects. Problems of determining the anomalous field of a thin-walled objects are of particular interest. The solution to this problem is largely determined by the existence of an effective system of programs for solving three-dimensional direct magnetometry problems – finding the fields of typical objects (by using sets of such objects you can approximate real objects). The article describes the operation of the main algorithm and subroutines that are part of the main algorithm of the developed MBEM software for modeling the magnetic fields of thin-walled structures. MBEM is based on the developed modified boundary element method, based on the classical boundary element method and the secondary source method. Numerical verification has been carried out and the efficiency of the developed algorithms and software components has been established on the problems of calculating the magnetic field of thin-walled structures for which solutions are known. The example of the software complex work is given – the calculation of the resulting field of a thin-walled pipe, namely the simulation of the tension vector in the plane that is under the object at a distance of one half meter.

Keywords: magnetic field, vector of magnetic tension, modified boundary element method, the MBEM software, thin-walled structures.

В. Рябенкий, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: optron2@gmail.com
И. Чудайкин, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: igorlu3141509@rambler.ru
Ю. Таргунакова, асп.,
E-mail: golubkajulya@gmail.com, тел. (0512) 44-16-49
Национальный Университет Кораблестроения им. адмирала Макарова
Кафедра Теоретической электротехники и электронных систем
пр. Центральный, 3, г. Николаев, 54021, Украина

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАМНЫХ КОМПОНЕНТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Магнитометрический раздел геофизики морских акваторий характеризуется переходом на качественно новый уровень исследования. Магнитометрические измерения используются при решении специализированных задач: трассировки трубопроводов, поиска затонувших судов, авиабомб и неразорвавшихся снарядов, для изучения подводных объектов культурного наследия. Идентификация таких объектов называется обратной задачей морской магнитометрии, и она относится к классу некорректно-поставленных задач. Первым этапом решения такой задачи является решение прямой задачи. Прямая задача состоит в определении аномального поля, создаваемого телами определенной формы, плотности при определенных условиях погружения и накопления информации об этих объектах. Особый интерес представляют задачи определения аномального поля объектов, состоящих из тонкостенных конструкций. Решение же этой проблемы во многом определяется наличием эффективной системы программ по решению трехмерных прямых задач магнитометрии – нахождение полей типичных тел (наборами которых можно аппроксимировать реальные объекты). В статье описывается работа главного алгоритма и подпрограмм, входящих в главный алгоритм разработанного программного комплекса MBEM для моделирования магнитных полей тонкостенных конструкций. MBEM создан на основе разработанного модифицированного метода граничных элементов, который основан на классическом методе граничных элементов и методе вторичных источников. Осуществлена численная проверка и установлена эффективность разработанных алгоритмов и программных компонентов на задачах расчета магнитного поля тонкостенных конструкций, для которых известны решения. Приведен пример работы программного комплекса – расчет результирующего поля тонкостенной трубы, а именно моделирование вектора напряженности на плоскости, которая находится под объектом на расстоянии полуметра.

Ключевые слова: магнитное поле, вектор магнитной напряженности, модифицированный метод граничных элементов, комплекс MBEM, тонкостенные конструкции.