

Отчет об использовании кластера ИВЦ НГУ

1. *Наименование работы*

Исследование систем источник-приемник (тороидальные и соленоидальные многовитковые катушки) в областях с анизотропной удельной электропроводностью для задач индукционного каротажа в частотной области.

2. *Состав коллектива исполнителей*

Архипов Дмитрий Александрович, младший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука.

3. *Контактное лицо (ФИО, адрес электронной почты)*

Архипов Д.А., d_arhipov@list.ru

4. *Аннотация*

Реализовано численное моделирование электромагнитного поля в частотной области в естественных переменных с вмещающей средой, учитывающее геометрическую структуру обмотки многовитковой катушки.

5. *Научное содержание работы*

(a) Постановка задачи.

Электромагнитные исследования околоскважинного пространства выполняются в широком диапазоне частот с локальными источниками (электрическая или магнитная многовитковые катушки).

В отчете будет рассмотрена генераторная многовитковая соленоидальная катушка (электрический источник) в скважине с изотропной вмещающей средой и многовитковая тороидальная катушка с ферромагнитным сердечником в однородной среде. Исследовано влияние способа аппроксимации многовиткового источника на поведение электромагнитного поля.

Расчетная область для исследования многовитковой соленоидальной катушки представляет собой скважину, с одним генератором и двумя приемниками, вмещающей средой и слабопроводящим слоем (рис. 1).

Аппроксимация соленоидального источника выполнена двумя методами: эффективная одновитковая петля (сила тока в которой умножается на число витков) и поверхность, на которой задана линейная плотность тока [1].

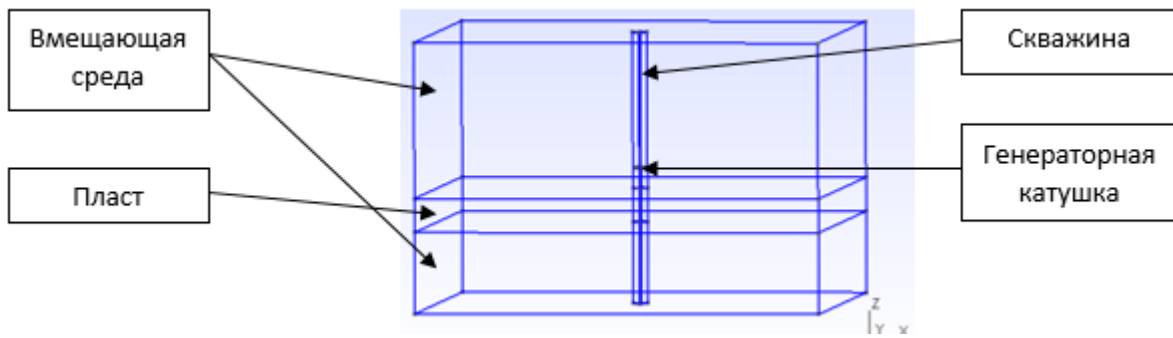


Рисунок 1. Расчетная область

Геометрические параметры расчетной области

Радиус скважины: 0.108 м.

Радиус катушек: 0.05 м.

Толщина слабопроводящего слоя - 0.5 м, глубина залегания слоя от 0.9 до 1.4 м.

Таблица 1 – Электрофизические характеристики среды

Область	ϵ_r	μ_r	σ [$Sm * m$]
Буровой раствор	1	1	0.5
Вмещающая среда	1	1	0.1
Пласт	1	1	0.01

Частота источника: 1 МГц. Сила тока: 1 А.

Исследование многовитковой тороидальной катушки выполнялось в однородной области. Геометрия катушки представлена на рис. 2.

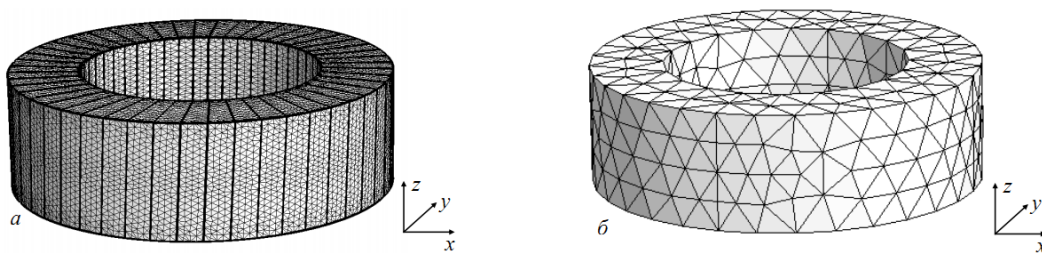


Рисунок 2. Тороидальная многовитковая катушка.

Аппроксимация тороидального источника выполнена двумя методами: электрический источник (учитывается обмотка катушки рис. 2а) и эффективный магнитный источник (задается внутри сердечника рис. 2б) [2].

(b) *Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.*

Напряженность электрического поля \mathbf{E} в частотной области с электрическим источником описывается уравнением Гельмгольца

$$\operatorname{rot}\mu^{-1}\operatorname{rot}\mathbf{E} + k^2\mathbf{E} = -i\omega\mathbf{J}_s,$$

$$\mathbf{E} \times \mathbf{n}|_{\partial\Omega} = 0$$

где $k^2 = i\omega\sigma - \omega^2\varepsilon$, \mathbf{E} -комплексная векторная функция, Ω - область моделирования, $\partial\Omega$ - граница области Ω , \mathbf{J}_s - вектор плотности тока, заданный в обмотке катушки или на поверхности, аппроксимирующей обмотку, $\mathbf{J}_s \in [\mathbf{L}_2(\Omega)]^3$.

Напряженность магнитного поля \mathbf{H} в частотной области с магнитным источником описывается уравнением

$$\operatorname{rot}(\sigma + i\omega\varepsilon)^{-1}\operatorname{rot}\mathbf{H} + i\omega\mu\mathbf{H} = \mathbf{M}$$

$$\mathbf{H} \times \mathbf{n}|_{\partial\Omega} = 0$$

где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля, \mathbf{M} – плотность магнитного тока.

На границах между подобластями Γ_{ij} с различными электрофизическими характеристиками должны выполняться условия непрерывности тангенциальной компоненты напряженности электрического и магнитного полей.

Выполнение условий непрерывности обеспечивает закон сохранения заряда в областях с разрывными электрофизическими характеристиками. Следовательно, вычислительные схемы как для решения систем уравнений Максвелла, так и для решения уравнения Гельмгольца, должны конструироваться таким образом, чтобы непрерывность выполнялась с заданной точностью. Векторный метод конечных элементов позволяет выполнить эти требования на уровне построения базиса.

(c) *Полученные результаты*

Моделировалось гармоническое электрическое поле в околоскважинном пространстве с изотропной вмещающей средой со слабопроводящим слоем. Выполнено исследование влияния способа аппроксимации источника на электродвижущую силу (ЭДС), наведенную в приемных катушках (рис. 3).

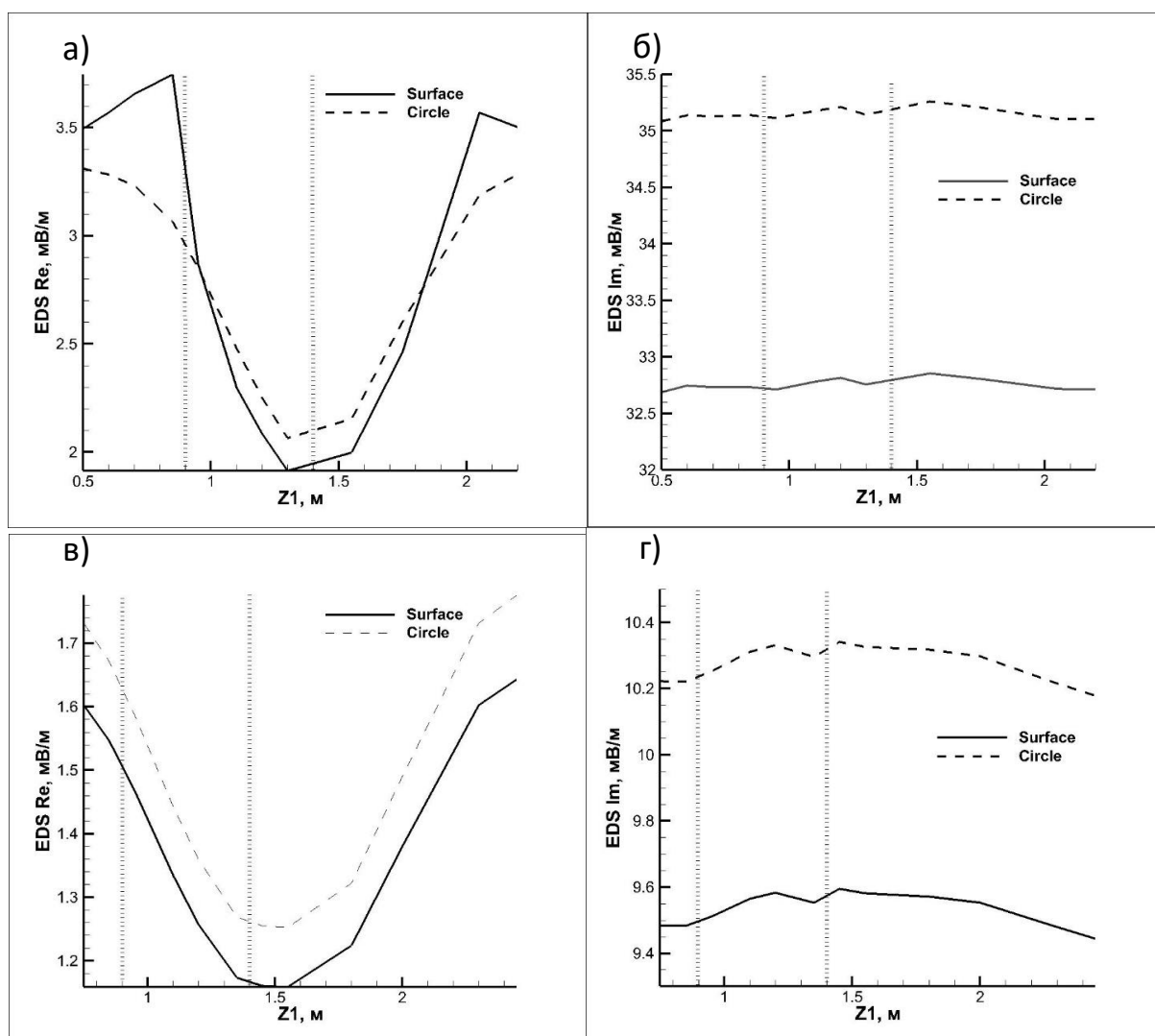


Рисунок 3. ЭДС наведенные в первой приемной катушке (а – действительная компонента, б – мнимая) и во второй приемной катушке (в – действительная компонента, г – мнимая) для двух методов аппроксимации источника. Вертикальным пунктиром обозначены границы слоя. z_1 – глубина первой приемной катушки.

Из рисунка 3 видно, что поведение мнимой компоненты ЭДС не реагирует на наличие пласта для обоих способов аппроксимации генераторной катушки, а действительная компонента реагирует одинаково, но при аппроксимации источника поверхностью с током, кровля пласта выделяется четче. Подошве пласта в обоих случаях соответствует минимум ЭДС.

Анализ методов аппроксимации тороидальной многовитковой катушки выполнялся в однородной области. В [2] показано, что эффективная плотность магнитного тока (рис. 4) в сердечнике катушки не зависит от свойств среды, и полностью определяется электрофизическими и геометрическими характеристиками источника, а вне сердечника равна 0.

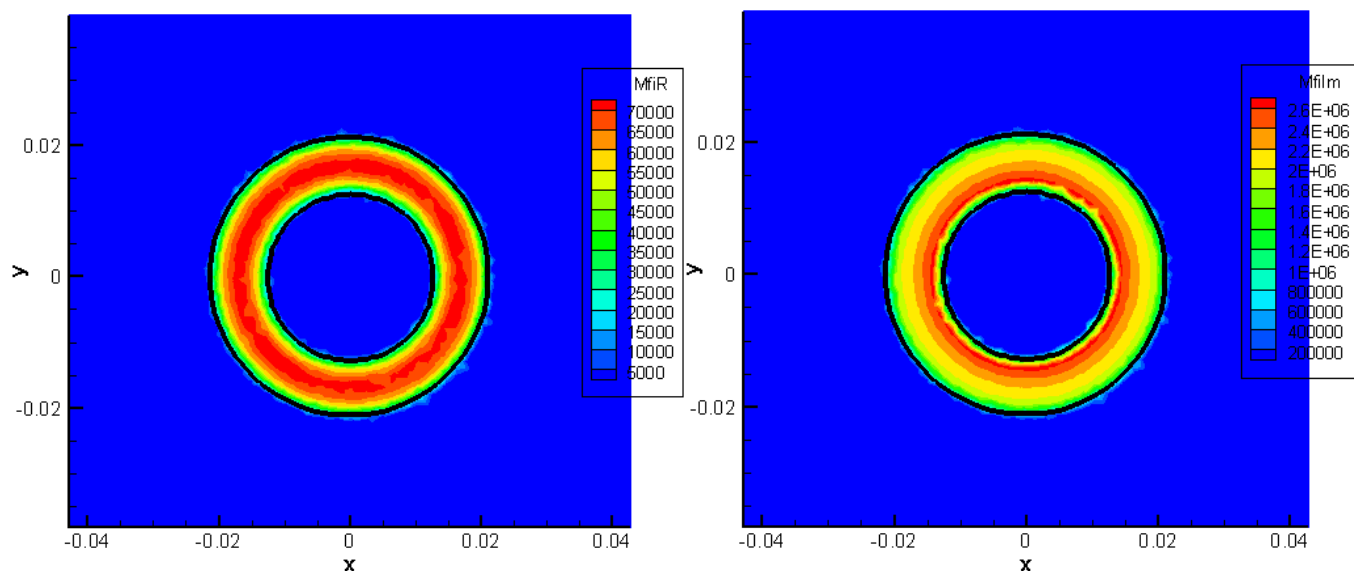


Рис. 4 Плотность магнитного тока в сечении $z = 0$ м. (слева действительная компонента M_ϕ , справа мнимая компонента M_ϕ).

Исследования показали, что поведение напряженности электромагнитного поля совпадают для обоих способов аппроксимации, но использование магнитной постановки позволяет строить сеточное разбиение независимо от обмотки катушки, что позволяет выполнять численное моделирование для любой геометрии генератора. Также магнитный источник имеет более простую структуру, по сравнению с электрическим источником. Следовательно, время решения конечноэлементной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для магнитной постановки получилось в 2-3 раза меньше, чем для электрической постановки [2].

(d) Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Использование кластера для решения поставленных задач позволяет строить численное моделирование для разномасштабных геометрических объектов расчетной области с адаптированной конечноэлементной сеткой, учитывающей все особенности задачи.

6. Перечень публикаций

1. Архипов Д.А., Штабель Н.В., Шурина Э.П. Влияние аппроксимации соленоидальной катушки на результаты математического моделирования электромагнитного поля в частотной области // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии – том 6 – № 1 – С. 87-93 – 2022.

2. Архипов Д.А., Шурина Э.П. Анализ аппроксимации тороидального источника электромагнитного поля // Вычислительные технологии – том 27 – № 4 – С. 63-76 – 2022.
3. Shurina E.P., Itkina N.B., Arhipov D.A., Dobrolubova D.V., Kutishcheva A.Yu., Markov S.I., Shtabel N.V., Shtanko E.I. Multiscale Finite Element Technique for Mathematical Modelling of Multi-physics Processes in Heterogeneous Media // Computational and Experimental Engineering and Sciences: Proceedings of the Conference, ICCES-2022 – Springer Verlag – Berlin – том 119 – С. 67-87 – 2022.
4. Шурина Э.П., Архипов Д.А. ModelingToroid3D: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ //
5. Архипов Д.А., Шурина Э.П. Аппроксимация тороидальной электромагнитной катушки эффективным магнитным током // Теоретические основы конструирования численных алгоритмов и решение задач математической физики: Тезисы Всероссийской научной конференции, посвященной памяти К.И. Бабенко (г. Пущино, 24-26 августа, 2022 г.) – ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – Москва – С. 23-24 – 2022.
6. Архипов Д.А., Шурина Э.П. Математическое моделирование электромагнитного поля при коротаже скважины в частотной области // Актуальные проблемы прикладной математики и механики: Тезисы докладов XI Всероссийской конференции с элементами школы молодых ученых, посвящ. памяти акад. А.Ф. Сидорова (Кабардинка, 1-7 сентября, 2022 г.) – Институт математики и механики УрО РАН им. Н.Н. Красовского – Екатеринбург – С. 8-9 – 2022.
6. Shurina E.P., Itkina N.B., Arhipov D.A., Dobrolubova D.V., Kutishcheva A.Yu., Markov S.I., Shtabel N.V., Shtanko E.I. Mathematical simulation of multiphysics phenomena using digital rock cores // Марчуковские научные чтения - 2022: Тезисы Международной конференции (г. Новосибирск, Академгородок, 3-7 октября 2022 г.) – Новосибирск – С. 73-73 – 2022.

7. *Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию.*

С появлением узлов с оперативной памятью 190 Гбайт, полностью перешел на ваш кластер и доволен его работой.