

# Расчёт процесса разгона макротела в рельсотроне без кожуха с помощью платформы Теметос

М.П. Галанин<sup>1,2</sup>, Д.Л. Сорокин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИИМ им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

**Аннотация.** Описаны методы решения задач в неограниченной области. Построены алгоритмы задания искусственных граничных условий для моделирования электромагнитного поля на основе формул Грина и закона Био — Савара — Лапласа. Рассуждения представлены на примере модели процесса разгона макротела в электродинамическом ускорителе рельсового типа. Приведены особенности программной реализации вычислительного алгоритма, в частности, описан процесс проведения вычислительного эксперимента с помощью графического интерфейса программной платформы Теметос. Представлены результаты расчётов, демонстрирующие корректность построенных методов.

**Ключевые слова:** электродинамический ускоритель, уравнения Максвелла, искусственные граничные условия, платформа Теметос

## Calculation Of The Macrobody Acceleration Process In A Railgun Without Casing Using The Temetos Platform

M.P. Galanin<sup>1,2</sup>, D.L. Sorokin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics (KIAM), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia

**Abstract.** Methods for solving problems in an unlimited field are considered. Algorithms for specifying artificial boundary conditions for modeling the electromagnetic field based on Green's formulas and the Biot – Savard – Laplace law are constructed. All arguments are presented on the example of constructing a model for calculating the process of acceleration of a macrobody in an electrodynamic rail-type accelerator. The features of the software implementation of the computational algorithm are presented, in particular, the process of conducting a computational experiment using the graphical interface of the Temethos platform is described. The results of

calculations are presented, demonstrating the correctness of the constructed methods.

**Keywords:** electrodynamic accelerator, Maxwell's equations

Необходимость рассчитывать пространственно-многомерные электромагнитные поля возникает при решении широкого круга задач науки и техники (магнитогидродинамические генераторы энергии, электродинамические ускорители макротел, астрофизические объекты и т. д.) [1]. Часто математическая модель для описания полей строится в неограниченной области. Это усложняет процесс численного решения задачи.

В работе [2] проведён анализ существующих методов решения эллиптических и волновых уравнений в неограниченной области. В частности, описаны метод замены переменных, метод граничных интегральных уравнений, метод разностных потенциалов [3, 4], метод введения бесконечных элементов совместно с конечными элементами [5, 6], методика использования квазиравномерных сеток совместно с методом конечных разностей [7] и др.

В статьях [8, 9] разработаны методы решения задач для оператора смешанного типа с финитной правой частью в неограниченной области, базирующиеся на основной интегральной формуле Грина [10].

В работах [1, 11] для расчёта электромагнитного поля в электродинамических ускорителях предложено использовать модель идеального кожуха и в качестве граничных условий на боковой поверхности ускорителя задавать равенство нулю тангенциальной компоненты напряжённости электрического поля.

С практической точки зрения наличие кожуха приводит к уменьшению ускоряющих характеристик устройства, поэтому в реальных ускорителях он, как правило, отсутствует.

Одним из возможных способов получения решения, соответствующего задаче в неограниченной области, является расширение расчётной области и тем самым удаление кожуха от ускорителя. Несмотря на то, что такой способ прост в реализации, он существенно увеличивает вычислительную сложность задачи, что неприемлемо. В данной работе предлагается задавать на боковой поверхности искусственные граничные условия в соответствии с законом Био — Савара — Лапласа.

Для постановки граничных условий на торцевых поверхностях расчётной области необходимо решить двумерную задачу с оператором смешанного типа в неограниченной области. В [1, 11] разработаны различные методы решения задач такого вида: метод расширения расчётной области, трёхэтапный алгоритм, метод задания интегральных граничных условий. Показано, что наиболее эффективным в двумерном

случае является метод задания искусственного граничного условия в интегральном виде.

Таким образом, в нашем вычислительном алгоритме при решении задачи используется закон Био — Савара — Лапласа для задания граничных условий на боковой поверхности расчётной области и метод задания интегральных граничных условий на торцевых. Благодаря этому в ограниченной области получается решение, соответствующее проекции на нее решения задачи в неограниченной области.

Для проведения вычислительных экспериментов требуется не только создать вычислительный алгоритм и программу, его реализующую, но и иметь средства для задания сложной геометрической формы устройства и анализа результатов. В ИПМ им. М.В. Келдыша РАН для проведения вычислительного эксперимента создана программная платформа Теметос [12, 13]. Архитектура платформы Теметос позволяет использовать её для решения широкого круга задач. Это достигается прежде всего благодаря модульности платформы. Соответствующие модули платформы созданы для подготовки исходных данных для расчётов и анализа их результатов.

Полученные с помощью разработанного программного обеспечения результаты свидетельствуют о корректности выбранных способов решения (выполнение законов сохранения, соответствие результатам натуральных экспериментов).

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 18-01-00252 и 18-31-20020.

### Литература

1. Галанин М.П., Попов Ю.П. Квазистационарные электромагнитные поля в неоднородных средах. М. : Наука; Физматлит, 1995. 320 с
2. Галанин М.П., Низкая Т.В., Софронов И.Л. Численное решение эллиптических уравнений и волнового уравнения в неограниченной области // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Т. VII-1. Математическое моделирование в низкотемпературной плазме. Часть 2. М.: Янус — К. 2008. С. 57 – 74.
3. Рябенский В.С. Метод разностных потенциалов для некоторых задач механики сплошных сред. М. : Наука, 1987.
4. Брушлинский К.В. Математические и вычислительные задачи магнитной гидродинамики. М. : Бином, Лаборатория знаний. 2009. 200 с.
5. Bettess P. Infinite Elements. Penshaw Press. 1992.
6. Zienkewicz O.J., Bettess P. A novel boundary infinite element // Int. J. Num. Meth. Eng., № 17, pp. 393 – 404.
7. Калиткин Н.Н., Альшин А.Б., Альшина Е.А., Рогов Б.В. Вычисления на квазиравномерных сетках. М.: Физматлит, 2005. 225 с.

8. Галанин М.П., Сорокин Д.Л. Разработка и применение численных методов решения задач в неограниченной области на основе третьей формулы Грина // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. № 246, 24 с.
9. Галанин М.П., Сорокин Д.Л. Разработка и применение численных методов решения уравнений смешанного типа в неограниченной области // Дифференциальные уравнения, 2019, Т. 55, № 7, с. 949 – 961.
10. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: Учебник. — 7-е изд. — М. : МГТУ. Наука. 2004. 798 с.
11. Уразов С.С. Математическое моделирование многомерных квазистационарных электромагнитных полей в канале электродинамического ускорителя [Текст] : дис. канд. ф.-м. наук : 05.13.18 — Москва, 2007. — 120 с.
12. Галанин М.П., Горбунов-Посадов М.М., Ермаков А.В., Лукин В.В., Родин А.С., Шаповалов К.Л. Архитектура программной платформы сопровождения вычислительного эксперимента Теметос // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2013. № 99. 23 с.
13. Галанин М.П., Лукин В.В., Родин А.С., Сорокин Д.Л. Применение программной платформы Теметос для разработки среды моделирования электромагнитного ускорителя // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2018. № 44. 32 с.

### References

1. Galanin M.P., Popov YU.P. Kvazistatsionarnyye elektromagnitnyye polya v neodnorodnykh sredakh. M. : Nauka; Fizmatlit, 1995. 320 s
2. Galanin M.P., Nizkaya T.V., Sofronov I.L. Chislennoye resheniye ellipticheskikh uravneniy i volnovykh uravneniy v neogranichennoy oblasti // Entsiklopediya nizkotemperaturnoy plazmy. Seriya B. T. VII-1. Matematicheskoye modelirovaniye v nizkotemperaturnoy plazme. Chast' 2. M. : Yanus - K. 2008. S. 57 - 74.
3. Ryaben'kiy V.S. Metod raznostnykh potentsialov dlya nekotorykh zadach mekhaniki sploshnykh sred. M. : Nauka, 1987.
4. Brushlinskiy K.V. Matematicheskiye i vychislitel'nyye zadachi magnitnoy gidrodinamiki. M. : Binom, Laboratoriya znaniy. 2009. 200 s.
5. Bettess P. Beskonechnyye elementy. Penschaw Press. 1992.
6. Zinkevich O.YU., Bettess P. Novyy granichnyy beskonechnyy element // Int. J. Num. Met. Angl., № 17, s. 393 - 404.
7. Kalitkin N.N., Al'shin A.B., Al'shina Ye.A., Rogov B.V. Vychisleniya na kvaziravnomernykh setkakh. M. : Fizmatlit, 2005. 225 s.
8. Galanin M.P., Sorokin D.L. Razrabotka i primeneniye chislennykh metodov resheniya zadach na osnove tret'yey formuly Grina // Preprinty IPM im. M.V. Keldysha, 2018. № 246, 24 s.

9. Galanin M.P., Sorokin D.L. Razrabotka i primeneniye chislennykh metodov resheniya uravneniy smeshannogo tipa v neogranichennoy oblasti // *Differentsial'nyye uravneniya*, 2019, s. 55, № 7, s. 949 - 961.
10. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki: Uchebnik. - 7-ye izd. - M. : MGTU. Nauka. 2004. 798 s.*
11. Urazov S.S. *Matematicheskoye modelirovaniye mnogomernykh kvazistatsionarnykh elektromagnitnykh poley v kanale elektrodinamicheskogo uskoritelya [Tekst]: dis. kand. f.-m. nauk: 05.13.18 - Moskva, 2007. - 120 s.*
12. Galanin M.P., Gorbunov-Posadov M.M., Yermakov A.V., Lukin V.V., Rodin A.S., Shapovalov K.L. *Arkhitektura programmnoy platformy soprovozhdeniya vychislitel'nogo eksperimenta Temetos // Preprinty IPM im. M.V. Keldysha RAN. 2013. № 99. 23 s.*
13. Galanin M.P., Lukin V.V., Rodin A.S., Sorokin D.L. *Primeneniye programmnoy platformy. Tematika dlya razrabotki sredy modelirovaniya elektromagnitnogo uskoritelya // Preprinty IPM im. M. V. Keldysh. 2018. № 44. 32 s.*