

Разработка и верификация вычислительной модели магнитной системы экспериментальной установки «Бета-распад», расчет пространственных распределений полей и сил

В. М. Амосков¹, В. Н. Васильев¹, А. Д. Грошева^{1,2}, О. А. Ковальчук¹, В. П. Кухтин¹, Е. А. Ламзин¹, Д. Д. Мельников^{1,2}, А. Н. Мурашкин³, Д. А. Овсянников², А. П. Серебров³, С. Е. Сычевский^{1,2}

¹ Научно-исследовательский институт

электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова,

Российская Федерация, 196641, Санкт-Петербург, Дорога на Металлострой, 3

² Санкт-Петербургский государственный университет,

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

³ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,

Российская Федерация, 188300, Гатчина, мкр. Орлова роща, 1

Для цитирования: Амосков В. М., Васильев В. Н., Грошева А. Д., Ковальчук О. А., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Мельников Д. Д., Мурашкин А. Н., Овсянников Д. А., Серебров А. П., Сычевский С. Е. Разработка и верификация вычислительной модели магнитной системы экспериментальной установки «Бета-распад», расчет пространственных распределений полей и сил // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2024. Т. 20. Вып. 4. С. 520–533.

<https://doi.org/10.21638/spbu10.2024.407>

Работа посвящена разработке и тестированию вычислительной модели прецизионной магнитной системы экспериментальной установки «Бета-распад» по измерению корреляционных коэффициентов бета-распада нейтрона, создаваемой в Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт» (Гатчина). Изучается магнитное поле системы в ее различных конфигурациях, а также возможность применения адаптированной геометрической модели к расчетам. Вычисляются распределения магнитных полей и сил, возникающих в системе. Верификация модели проводится с помощью сопоставления результатов поверочных расчетов, выполненных несколькими независимыми комплексами вычислительных программ. Результаты численного моделирования совпадают с требуемой точностью для всех используемых комплексов программ, в частности, оценка относительного отклонения значений сил не превышает 3 %.

Ключевые слова: вычислительные модели, магнитные системы, магнитные поля.

1. Введение. Согласно Стандартной модели, смешивание поколений кварков описывается в терминах матрицы Кабиббо – Кобаяши – Маскава (ККМ). Значения ее матричных элементов определяются экспериментально. В частности, матричный элемент, отвечающий за смешивание *u*- и *d*-кварков, может быть определен из бета-распада нейтрона. Однако задача проведения эксперимента такого рода требует очень точного измерения времени жизни нейтрона и асимметрии его распада [1, 2].

В настоящей работе приводятся результаты расчетов магнитных полей и сил, возникающих в магнитной системе экспериментальной установки «Бета-распад» по измерению корреляционных коэффициентов бета-распада нейтрона, создаваемой в Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт» (ПИЯФ, Гатчина). Работа

предполагает использование нескольких подходов для обеспечения точности и надежности полученных результатов. Для реализации различных методов вычисления магнитных полей и сил были использованы следующие программные пакеты: КОМПОТ [3–8], KLONDIKE [9–11], COMSOL [12, 13]. КОМПОТ и COMSOL применяют дифференциальный подход, KLONDIKE — интегральные методы [14–16].

Критерием качества результатов может служить совпадение значений, определенных разными подходами. Такая стратегия позволит не только выявить недостатки и преимущества каждого подхода, но и найти наиболее оптимальный метод расчета подобных систем. Приведенные результаты сравниваются с данными ПИЯФ [17, 18].

2. Экспериментальная установка «Бета-распад». Эта установка предназначена для измерения корреляционных коэффициентов бета-распада нейтрона. В эксперименте [1] (рис. 1) пучок нейтронов поляризуется с помощью ячеек с гелием-3 и попадает в область распада, ограниченную электродом. Все протоны и электроны вытягиваются из области распада нейтронов электрическим полем и попадают на детекторы. Основными компонентами магнитной системы экспериментальной установки являются сверхпроводящий соленоид с магнитной пробкой и магнитопрод.

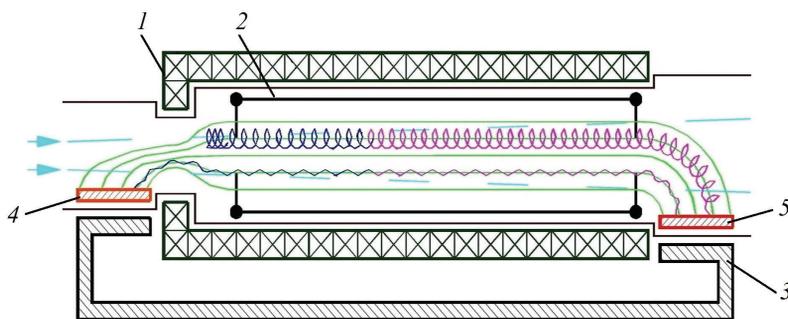


Рис. 1. Схема эксперимента для измерения электронной асимметрии распада нейтрона (заимствовано из [1, с. 194])
 1 — сверхпроводящий соленоид с магнитной пробкой; 2 — цилиндрический ПИЯФ;
 3 — магнитопрод; 4 — детектор электронов; 5 — детектор протонов.

В данной работе исследуются магнитные поля, индуцированные магнитной системой установки, которая состоит из соленоида, магнитного экрана и магнитопровода (рис. 2).

Соленоид составлен из двух частей: короткого «пробкового соленоида» с индукцией магнитного поля 0.35 Тл в области однородного поля и длинного «основного соленоида» с индукцией 0.8 Тл в области магнитной пробки. Ток в соленоиде составляет 1 кА. Каждая из частей соленоида представляет собой систему коаксиальных катушек: «пробковый» состоит из 4 катушек, «основной» — из 6. В обмотке соленоида используется два вида кабеля, отличающиеся шириной и высотой намотки.

3. Расчет магнитных полей.

3.1. Магнитное поле соленоида. При намотке «основного соленоида» использовались два кабеля разной ширины: 2.1 мм (№ 1) и 2.4 мм (№ 2). Так как значения достаточно близки, то при разбиении области расчета в месте перехода с одного кабеля на другой возникают слишком малые конечные элементы, которые влияют на сходимость задачи. Поэтому была принята адаптированная геометрическая модель, в которой используется только кабель № 1. Принципиальная схема системы соленоид-

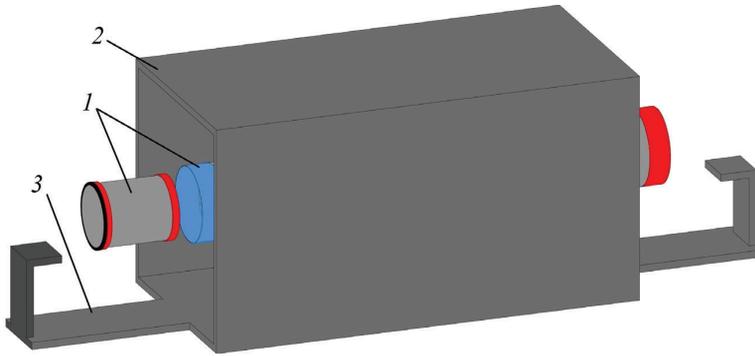


Рис. 2. Общий вид магнитной системы
 1 — сверхпроводящий соленоид с магнитной пробкой; 2 — магнитный экран;
 3 — магнитопровод.

дов представлена на рис. 3. В адаптированной геометрической модели заштрихованная область отсутствует.

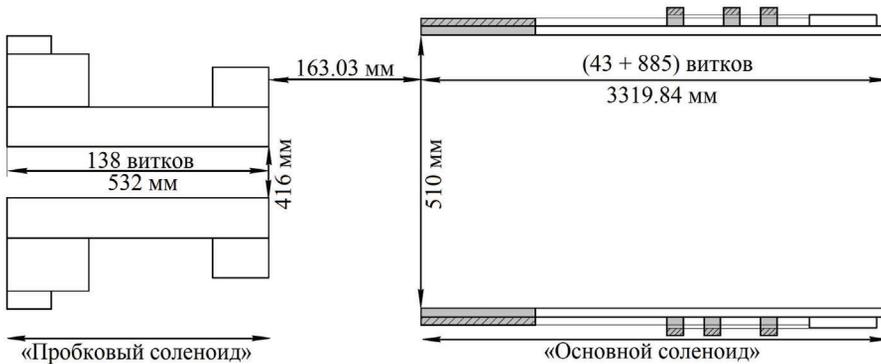


Рис. 3. Принципиальная схема геометрической модели системы соленоидов
 Светлым обозначен кабель № 1, темным — кабель № 2. Масштаб вдоль оси z не соблюден.

Для проверки допустимости такого представления и его влияния на магнитное поле соленоида были проведены расчеты с помощью программного пакета KLONDIKE. Расчетная модель показана на рис. 4. Ось Oz направлена вдоль оси соленоида. Начало координат по оси Oz соответствует крайнему левому срезу «пробкового соленоида», а по осям Ox и Oy — оси соленоида.

Зависимости модуля магнитного поля B от координаты z вдоль оси соленоида для точной и адаптированной моделей представлены на рис. 5. В масштабе рисунка кривые совпадают. Абсолютное и относительное отклонения модуля поля B показаны на рис. 6. На графиках абсолютного и относительного отклонений крестиками обозначена область замены кабеля № 2 на кабель № 1.

Максимальное отклонение значения модуля магнитного поля B приходится на область замены одного кабеля на другой. Задание адаптированной геометрической модели практически не влияет на результаты расчетов (относительное отклонение — менее 0.015 %).

В рамках адаптированной модели расчет магнитного поля соленоида производил-



Рис. 4. Вид соленоида в графическом редакторе KLONDIKE

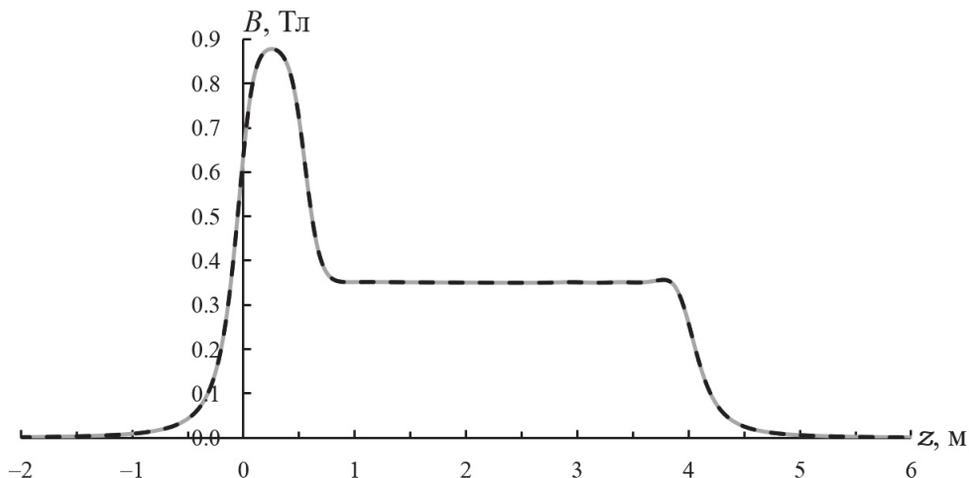


Рис. 5. Зависимости модуля магнитного поля B от координаты z вдоль оси соленоида для точной (сплошная линия) и адаптированной (пунктирная) геометрических моделей соленоида

ся с помощью: (i) программного пакета КОМПОТ в цилиндрической системе координат; (ii) программного пакета КОМПОТ в декартовой системе координат; (iii) программы KLONDIKE.

Поскольку соленоид обладает осевой симметрией, то естественной системой координат для расчета его магнитного поля является цилиндрическая система. Однако наличие магнитопровода и экрана нарушает эту симметрию, что затрудняет использование цилиндрических координат. Для корректного задания этих элементов наиболее удобна декартова система. Для сравнения значений магнитного поля, полученных с помощью КОМПОТ в разных системах координат, приводится расчет поля, выполненный средствами KLONDIKE.

На рис. 7 представлено, как изменяются абсолютное и относительное отклонения значений магнитного поля на оси соленоида (ось z). Наибольшее значение поля $B = 0.879$ Тл достигается при $z = 0.254$ м. Результаты расчета методами (i) и (ii) отличаются от (iii) не больше, чем на 0.19 %, что говорит о надежности использования декартовой системы координат в КОМПОТ при определении магнитного поля соленоида.

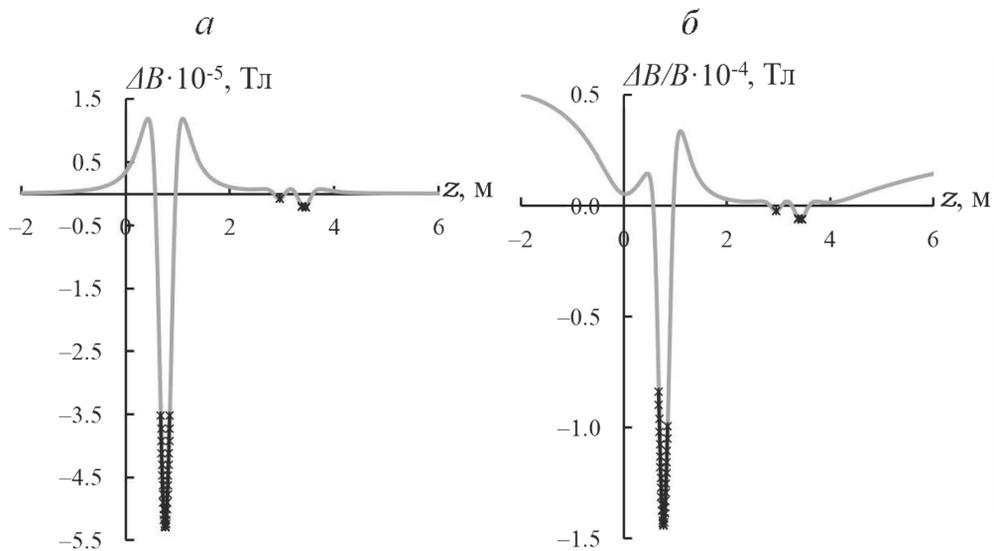


Рис. 6. Абсолютное (а) и относительное (б) отклонения магнитного поля адаптированной модели соленоида от точной модели

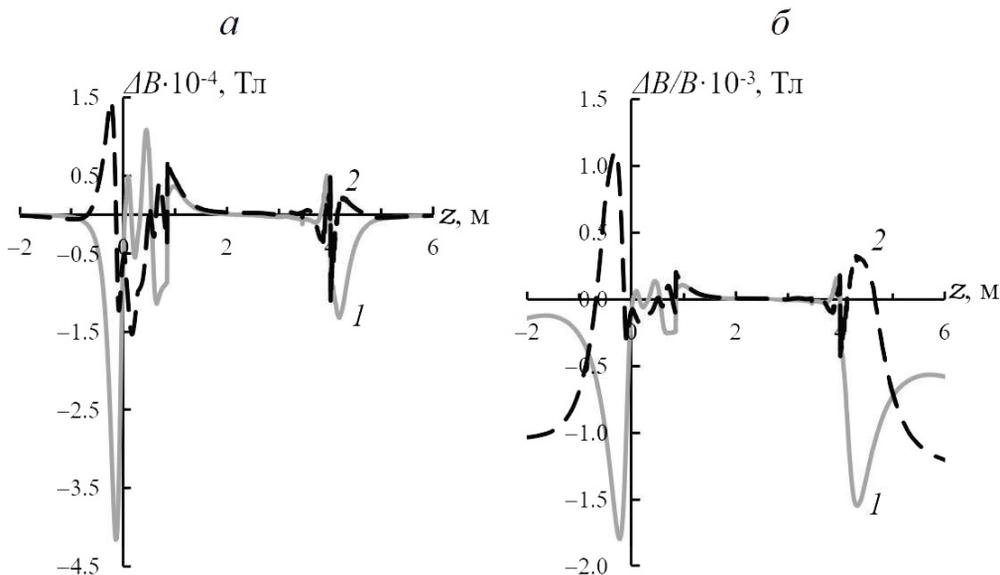


Рис. 7. Абсолютное (а) и относительное (б) отклонения магнитного поля, полученного в КОМПОТ, от поля, определенного при помощи KLONDIKE
1 — метод (i); 2 — метод (ii).

3.2. Магнитное поле полной магнитной системы. Для описания полной магнитной системы система координат была введена так, что начало координат по оси z соответствует крайнему левому срезу «пробкового соленоида», а по осям x и y — оси соленоида. Принятые направления осей представлены на рис. 8.

Вычисление магнитного поля полной магнитной системы производилось двумя

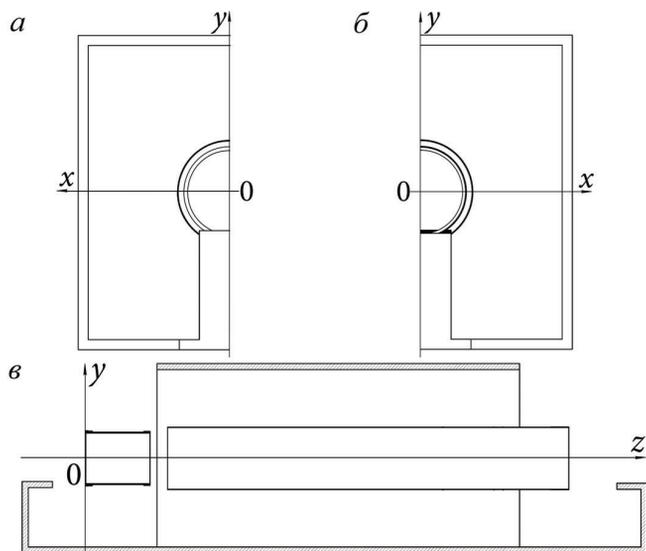


Рис. 8. Направление осей
a — вид с торца со стороны «пробковой катушки»; *б* — вид с торца со стороны «основной катушки»; *в* — вид сбоку.

способами. В способе (i) расчет магнитного поля системы целиком выполнялся с помощью программного пакета КОМПОТ. При этом применялась декартова система координат. В способе (ii), используя КОМПОТ, задавались только магнитопровод и магнитный экран, а магнитное поле соленоида учитывалось как внешнее по отношению к системе и вычислялось с помощью KLONDIKE.

На рис. 9, 10 приведены зависимости модуля магнитного поля на оси соленоида (ось z) для методов (i) и (ii). На рис. 9 кривые в масштабе графика совпадают. Также рис. 11 иллюстрирует графики абсолютного и относительного отклонений значений поля, полученных методом (i), от результатов способа (ii). Наибольшее значение поля $B = 0.885$ Тл достигается при $z = 0.25$ м.

Максимальное отклонение результатов расчетов этими методами не превышает 0.6 %. Стоит отметить, что представление магнитного поля соленоида в качестве внешнего поля для системы «магнитный экран и магнитопровод» негативно влияет на скорость сходимости расчетов и достижение требуемой точности.

4. Сравнение полученных результатов. На рис. 12 представлены зависимости модуля магнитного поля соленоида и магнитной системы вдоль оси соленоида (ось z), построенные по данным Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры (НИИЭФА) (пунктирная линия) и ПИЯФ (сплошная); на рис. 13 — абсолютное и относительное отклонения значений поля, вычисленные в ПИЯФ, от поля, полученного в НИИЭФА. Результаты расчетов отличаются не больше, чем на 3.5 %.

5. Расчет сил и моментов сил. На основе данных, полученных в п. 4, были вычислены силы, действующие на магнитный экран и магнитопровод со стороны системы соленоидов, а также момент сил относительно точки A , которая расположена на оси соленоида и симметрична относительно пластины магнитопровода по оси z (рис. 14). Расчеты были проведены с помощью программного пакета КОМПОТ и комбинации КОМПОТ и KLONDIKE, а также были использованы два вида маг-

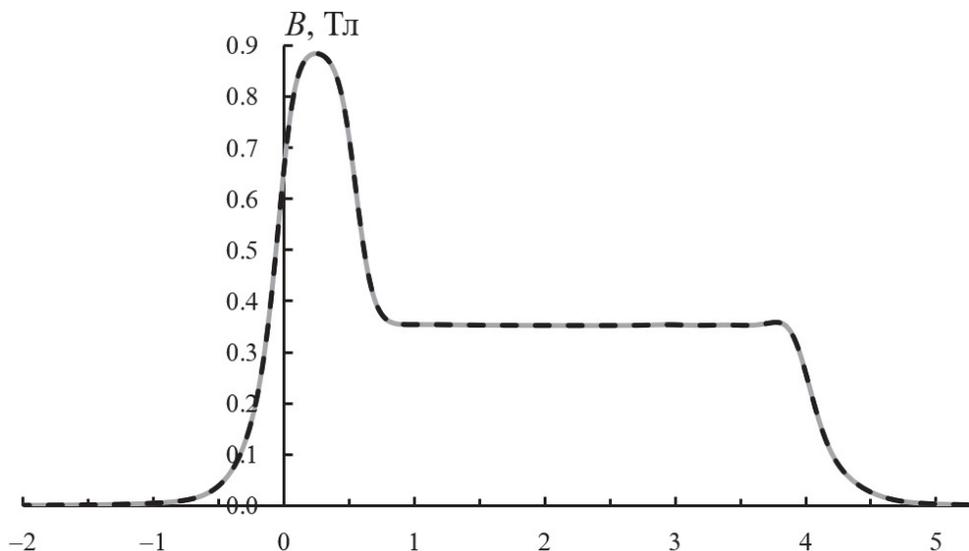


Рис. 9. Зависимости модуля магнитного поля B от координаты z вдоль оси соленоида для метода (i) — расчет КОМПОТ (сплошная линия) и для метода (ii) — расчет КОМПОТ и KLONDIKE (пунктирная)

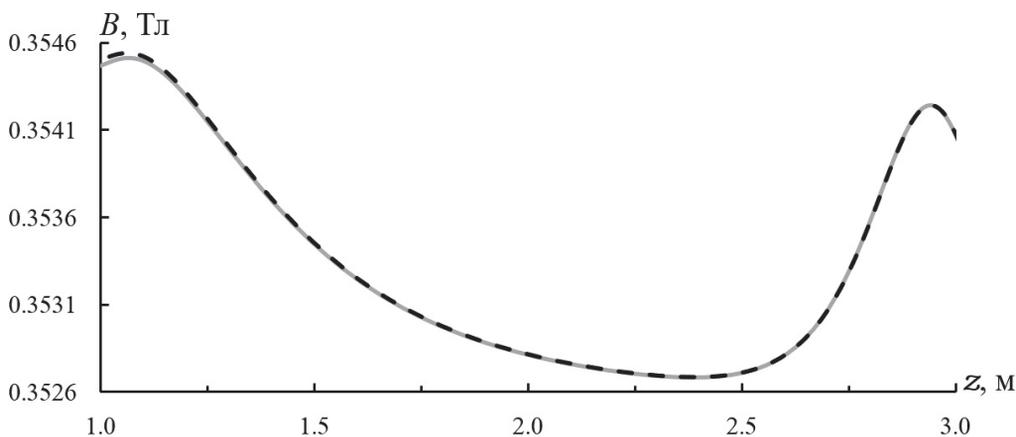


Рис. 10. Зависимости модуля магнитного поля B от координаты z вдоль оси соленоида в области однородного поля для метода (i) — расчет КОМПОТ (сплошная линия) и для метода (ii) — расчет КОМПОТ и KLONDIKE (пунктирная)

нитных материалов: АРМКО (технически чистое железо) и сталь-10. Для дополнительной верификации результатов был произведен расчет средствами коммерческого проприетарного продукта — COMSOL.

Результаты вычисления сил и моментов сил, полученные в ПИЯФ и НИИЭФА, приведены в таблице.

6. Заключение. В рамках поддержки работ по созданию и наладке магнитной системы экспериментальной установки «Бета-распад» (в ПИЯФ) для измерения корреляционных коэффициентов бета-распада нейтрона была разработана прецизионная вычислительная модель и проведена ее верификация путем сопоставления резуль-

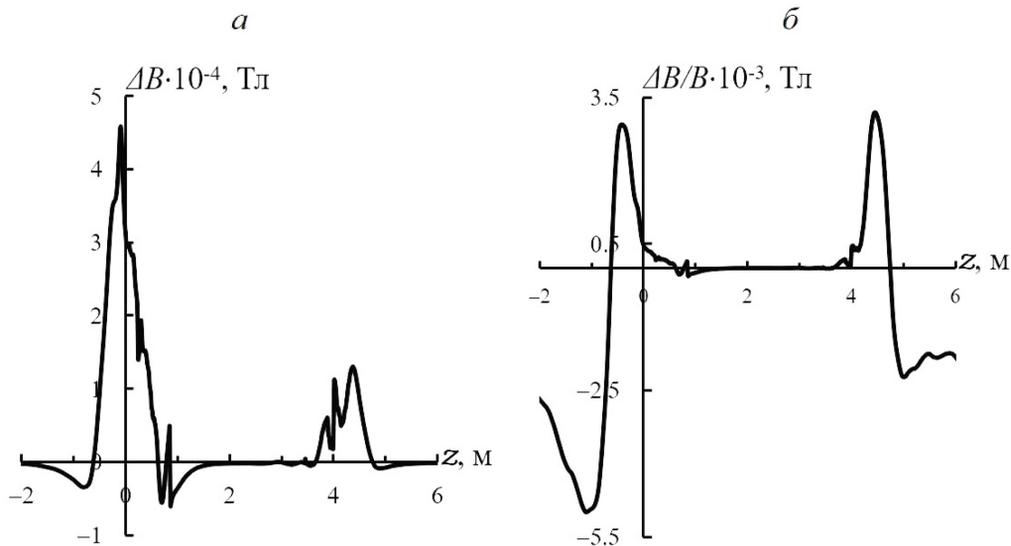


Рис. 11. Абсолютное (а) и относительное (б) отклонения магнитного поля

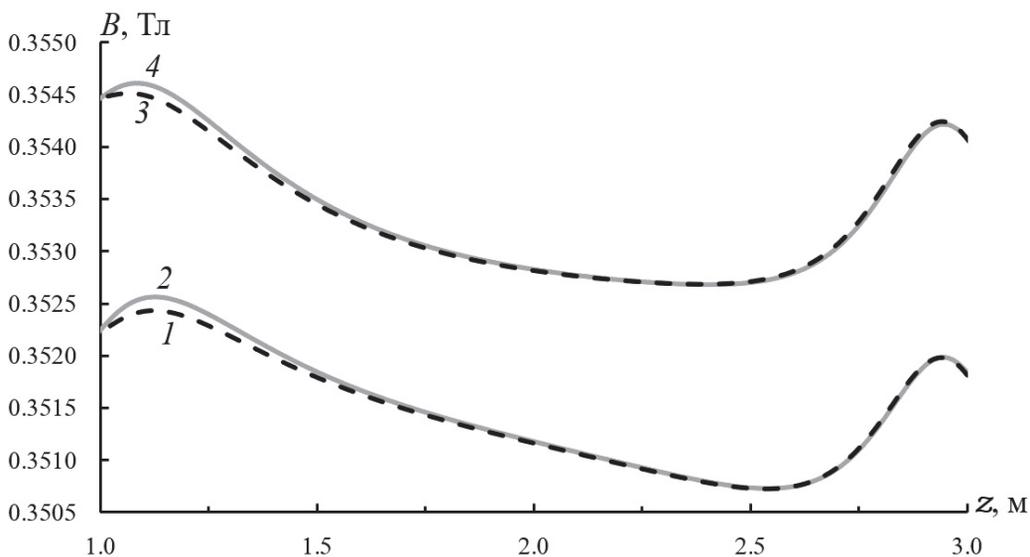


Рис. 12. Зависимости модуля магнитного поля B соленоида (1, 2) и полной магнитной системы (3, 4) от координаты z вдоль оси соленоида в области однородного поля, вычисленные НИИЭФА (пунктирная линия) и ПИЯФ (сплошная)

татов поверочных расчетов, выполненных несколькими независимыми комплексами вычислительных программ.

Пространственные распределения магнитных полей и пондеромоторных сил моделировались с использованием нескольких подходов: 1) геометрическая форма элементов магнитной системы (ферромагнитные материалы и токонесущие катушки) полностью задавалась с помощью программного пакета КОМПРОТ, магнитные поля

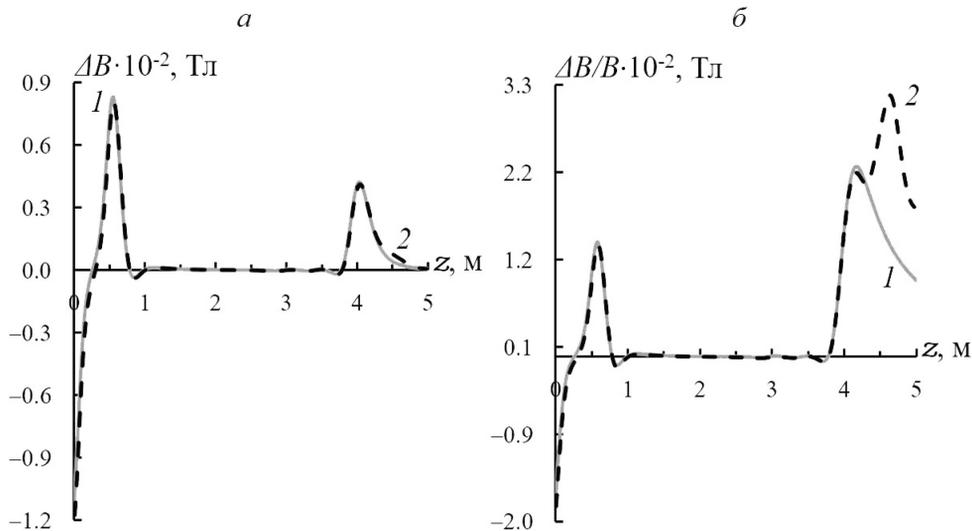


Рис. 13. Абсолютное (а) и относительное (б) отклонения магнитного поля соленоида (1) и полной магнитной системы (2), вычисленного ПИЯФ (сплошная линия), от поля, определенного НИИЭФА (пунктирная)

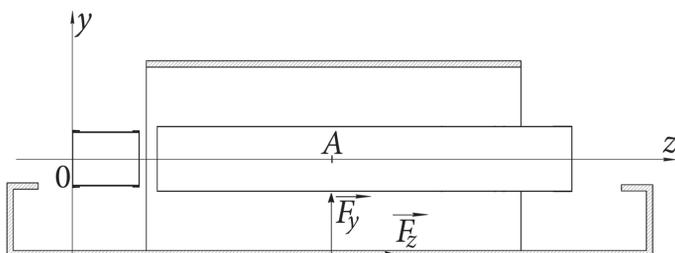


Рис. 14. Направления F_y и F_z компонент силы, действующей на магнитный экран и магнитопровод

Таблица. Значения F_y и F_z компонент сил и M_x компоненты моментов сил

Расчет	Материал	F_y , Н	F_z , Н	M_x , Н·м
ПИЯФ	АРМКО	1100	990	1770
КОМПОТ	АРМКО	1128	1080	1574
КОМПОТ и KLONDIKE	АРМКО	1124	1082	1566
КОМПОТ	Сталь-10	987	911	1340
КОМПОТ и KLONDIKE	Сталь-10	987	921	1340
COMSOL	Сталь-10	1069	988	1467

и силы вычислялись средствами этого пакета; 2) геометрическая форма экрана и магнитопровода задавалась в программном пакете КОМПОТ, а соленоид представлялся в виде внешнего (по отношению к ферромагнитным элементам) поля токонесящих катушек, которое рассчитывалось в программном пакете KLONDIKE. Магнитные поля и силы вычислялись средствами пакета КОМПОТ; 3) магнитная система установки полностью задавалась с помощью программного пакета COMSOL, магнитные поля и силы определялись средствами этого пакета.

Результаты численного моделирования, полученные при применении такого под-

хода, совпадают с требуемой точностью для всех трех комплексов программ, в частности оценка относительного отклонения значений сил не превышает 3 %.

Дополнительные сравнения были выполнены с данными, полученными в ПИЯФ. Была рассмотрена зависимость магнитного поля вдоль оси соленоида (от продольной координаты z). Анализ показал, что характер зависимости идентичен, значения, вычисленные в характерных точках, совпадают с требуемой точностью.

Дополнительно следует подчеркнуть, что в модели учитывались свойства магнитных материалов, характеризующиеся нелинейной зависимостью индукции магнитного поля в стали от напряженности поля, $B(H)$, или магнитной проницаемости от напряженности, $\mu(H)$. При этом в расчетах НИИЭФА и ПИЯФ кривые, описывающие зависимости, несколько отличались. Полученное в этих условиях согласие данных свидетельствует о возможности оптимального выбора марки магнитной стали на соответствующем этапе разработки. В дальнейшем натурные измерения (например, в НИИЭФА [19] для полного диапазона изменения индукции) зависимости для конкретной партии стали позволят в случае необходимости выполнить корректировку изготавливаемой магнитной системы.

Вычислительные комплексы программ КОМПОТ и KLONDIKE разработаны в Российской Федерации и зарегистрированы в Агентстве по патентам и товарным знакам [6–8, 11], что обеспечивает импортнезависимость вычислительных технологий моделирования магнитных систем электрофизических установок.

Вклад авторов. ПИЯФ: разработка концепции установки и принципов ее построения, численное моделирование с использованием независимого кода.

СПБУ: разработка вычислительной технологии расчета установки с использованием детальных математических моделей, сопоставление результатов расчетов по различным независимым моделям.

НИИЭФА: разработка сверхпроводящей системы установки, формирование набора данных о нелинейных магнитных свойствах, используемых в установке сталей, моделирование системы с использованием интегральных подходов.

Литература

1. Серебров А. П., Васильев А. В., Варламов В. Е., Гельтенборт П., Гриднев К. А., Дмитриев С. П., Доватор Н. А., Егоров А. И., Ежов В. Ф., Жеребцов О. М., Зиновьев В. Г., Ивочкин В. Г., Иванов С. Н., Иванов С. А., Коломенский Э. А., Коноплев К. А., Краснощекова И. А., Ласаков М. С., Лямкин В. А., Мартемьянов В. П., Мурашкин А. Н., Неустров П. В., Онегин М. С., Петелин А. Л., Пирожков А. Н., Полошкин А. О., Прудников Д. В., Рябов В. Л., Самойлов Р. М., Сбитнев С. В., Фомин А. К., Фомичев А. В., Циммер О., Черный А. В., Шока И. В. Программа исследования фундаментальных взаимодействий для реактора ПИК // Ядерная физика. 2016. Т. 79. № 3. С. 187–197.
2. Serebrov A., Rudnev Yu., Murashkin A., Zherebtsov O., Kharitonov A., Korolev V., Morozov T., Fomin A., Pusenkov V., Schebetov A., Varlamov V. Project of Neutron Beta-decay A-asymmetry measurement with relative accuracy of $(1-2) \times 10^{-3}$ // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 2005. N 4. P. 383–387. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.110.057>
3. Doynikov N., Lamzin E., Sytchevsky S. On computation of 3-D magnetostatic fields of electrophysical apparatus magnet systems // IEEE Transactions on Magnetics. 1992. N 28. P. 908–911. <https://doi.org/10.1109/20.120025>
4. Belov A., Belyakova T., Filatov O., Kukhtin V., Lamzin E., Shatil N., Sytchevsky S., Gridnev K., Semchenkov A., Semchenkova O., Artukh A., Sereda Yu., Teterev Yu., Budzanowski A., Koscielniak F., Szmider J. Program package for accurate 3D reconstruction of magnetic fields from the boundary measurements // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. 2003. N 513. P. 448–464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2003.07.004>
5. Arslanova D., Gavrish Yu., Gaponok E., Grosheva A., Knyazev N., Kukhtin V., Lamzin E.,

Nezhentsev A., Ovsyannikov A., Ovsyannikov D., Sytchevsky S., Znamenshchikova N. Feasibility study of permanent magnet dipoles for SILA facility // *Cybernetics and Physics*. 2023. Vol. 12. N 4. P. 252–256. <https://doi.org/10.35470/2226-4116-2023-12-4-252-256>

6. Белов А. В., Белякова Т. Ф., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Сычевский С. Е., Филатов О. Г. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612492: Программный комплекс для трехмерного расчета стационарного магнитного поля, анализа и синтеза магнитных систем электрофизических установок (КОМПОТ/М 1.0). Реестр программ для ЭВМ. М., 2003, 12 ноября.

7. Белов А. В., Белякова Т. Ф., Беляков В. А., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Сычевский С. Е., Филатов О. Г. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612494: Программный комплекс для численного моделирования пространственного стационарного распределения электрических токов в геометрически сложных областях (КОМПОТ/С 1.0). Реестр программ для ЭВМ. М., 2003, 12 ноября.

8. Белов А. В., Белякова Т. Ф., Беляков В. А., Васильев В. Н., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Сычевский С. Е., Филатов О. Г., Шатиль Н. А. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612493: Программный комплекс для численного решения трехмерных стационарных задач теплопроводности (КОМПОТ/Т 1.0). Реестр программ для ЭВМ. М., 2003, 12 ноября.

9. Дион Ш. Я., Капаркова М. В., Кухтин В. П., Макаров А. А., Родин И. Ю., Сычевский С. Е., Фирсов А. А. Разработка вычислительных моделей для анализа магнитного поля в помещениях медицинских учреждений и госпиталей с целью нормализации его уровня. I. Искажение геомагнитного поля // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2022. Т. 18. Вып. 3. С. 365–378. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2022.306>

10. Amoskov V. M., Belov A. V., Belyakov V. A., Belyakova T. F., Gribov Yu. V., Kukhtin V. P., Lamzin E. A., Sytchevsky S. E. Computation technology based on KOMPOT and KLONDIKE codes for magnetostatic simulations in tokamaks // *Plasma Devices and Operations*. 2008. Vol. 16. N 2. P. 89–103. <http://dx.doi.org/10.1080/10519990802018023>

11. Амосков В. М., Белов А. В., Беляков В. А., Белякова Т. Ф., Гапionoк Е. И., Гаркуша Д. Б., Глухих М. И., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Максименкова Н. А., Мингалев Б. С., Сычевский С. Е., Филатов О. Г. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612487: Программный комплекс для расчета магнитных систем, содержащих магнитотвердые, магнитомягкие и токонесящие элементы конструкции сложной геометрической формы (KLONDIKE 1.0). Реестр программ для ЭВМ. М., 2003, 12 ноября.

12. COMSOL Multiphysics®v.6.2 // COMSOL®Software Version 6.2.

URL: <https://www.comsol.com/> (дата обращения: 25 февраля 2024 г.).

13. Красников Г. Е., Нагорнов О. В., Старостин Н. В. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics. М.: Национальный исследовательский ядерный университет Московского инженерно-физического института, 2012. 184 с.

14. Френкель Я. И. Собрание избранных трудов. Т. 1. Общая теория электричества. М.; Л.: Издательство АН СССР, 1956. 370 с.

15. Carpenter C. J. Theory and application of magnetic shells // *Proceedings of the IEEE*. 1967. Vol. 114. N 7. P. 995–1000.

16. Strang G., Fix G. An analysis of the FE method. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1973. 306 p.

17. Elleaume P., Chubar O., Chavanne J. Computing 3D magnetic field from insertion devices // *Proceedings of the 17th IEEE Particle Accelerator Conference (PAC'97)*. Vancouver, British Columbia, 1997. P. 3509–3511. <https://doi.org/10.1109/PAC.1997.753258>

18. Chubar O., Elleaume P., Chavanne J. A 3D magnetostatics computer code for insertion devices // *Proceedings of the 6th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI'97)*. Himeji, Hyogo, Japan, 1997. P. 481–484. <https://doi.org/10.1107/S0909049597013502>

19. Амосков В. М., Беляков В. А., Белякова Т. Ф. Аппаратно-программный комплекс для измерения характеристик магнитных материалов в широком диапазоне индукций. Дубна: Объединенный институт ядерных исследований, 2004. 19 с.

Статья поступила в редакцию 11 августа 2024 г.

Статья принята к печати 4 октября 2024 г.

Контактная информация:

Амосков Виктор Михайлович — канд. физ.-мат. наук; <https://orcid.org/0000-0001-9781-9116>, amoskov-sci@yandex.ru

Васильев Вячеслав Николаевич — <https://orcid.org/0000-0002-1218-6274>, vvnvm@mail.ru

Грошева Александра Дмитриевна — <https://orcid.org/0009-0003-1242-314X>,
a.d.grosheva@yandex.ru

Ковальчук Олег Анатольевич — <https://orcid.org/0009-0006-2911-7407>,
kovalchuk@sintez.niiefa.spb.su

Кухтин Владимир Петрович — канд. физ.-мат. наук; <https://orcid.org/0000-0001-6925-6141>,
kukhtin-sci@yandex.ru

Ламзин Евгений Анатольевич — д-р физ.-мат. наук; <https://orcid.org/0000-0002-6072-5711>,
lamzin-sci@yandex.ru

Мельников Дмитрий Денисович — <https://orcid.org/0009-0007-9265-9556>, dim.meln@yandex.ru

Мурашкин Александр Николаевич — <https://orcid.org/0009-0001-9789-3268>,
murashkin_an@pnpi.nrcki.ru

Овсянников Дмитрий Александрович — д-р физ.-мат. наук, проф.;
<https://orcid.org/0000-0002-0829-2023>, dovs45@mail.ru

Серебров Анатолий Павлович — д-р физ.-мат. наук, проф.;
<https://orcid.org/0000-0002-6734-038X>, serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru

Сычевский Сергей Евгеньевич — д-р физ.-мат. наук; <https://orcid.org/0000-0003-1527-4015>,
syтч-sie@yandex.ru

Development and verification of a computational model of the magnetic system of the “Beta-decay” experimental facility, calculation of spatial distributions of fields and forces

V. M. Amoskov¹, V. N. Vasiliev¹, A. D. Grosheva^{1,2}, O. A. Kovalchuk¹, V. P. Kukhtin¹,
E. A. Lamzin¹, D. D. Melnikov^{1,2}, A. N. Murashkin³, D. A. Ovsyannikov², A. P. Serebrov³,
S. E. Sytchevsky^{1,2}

¹ D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus,

3, Doroga na Metallostroy, St. Petersburg, 196641, Russian Federation

² St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg,
199034, Russian Federation

³ Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov
of National Research Centre “Kurchatov Institute”, 1, mkr. Orlova roshcha, Gatchina,
188300, Russian Federation

For citation: Amoskov V. M., Vasiliev V. N., Grosheva A. D., Kovalchuk O. A., Kukhtin V. P., Lamzin E. A., Melnikov D. D., Murashkin A. N., Ovsyannikov D. A., Serebrov A. P., Sytchevsky S. E. Development and verification of a computational model of the magnetic system of the “Beta-decay” experimental facility, calculation of spatial distributions of fields and forces. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2024, vol. 20, iss. 4, pp. 520–533. <https://doi.org/10.21638/spbu10.2024.407> (In Russian)

The work is devoted to the development and testing of a computational model of the precision magnetic system of the experimental facility “Beta-decay” for measuring the correlation coefficients of the neutron beta-decay, created at the Scientific Research Center “Kurchatov Institute”. The magnetic field of the system in its various configurations is studied, and the possibility of applying an adapted geometric model to calculations is also investigated. The distributions of magnetic fields and forces arising in the system are calculated. Verification of the model is carried out by comparing the results of calculations performed by several independent software. The results of numerical modeling coincide with the required accuracy for all software packages used, in particular, the estimate of the relative deviation of the force values does not exceed 3 %.

Keywords: computational models, magnetic systems, magnetic fields.

References

1. Serebrov A. P., Vassiljev A. V., Varlamov V. E., Egorov A. I., Ezhov V. F., Zhrebtsov O. M., Zinoviev V. G., Ivochkin V. G., Ivanov S. N., Ivanov S. A., Kolomensky E. A., Konoplev K. A., Krasnoschekova I. A., Lasakov M. S., Lyamkin V. A., Murashkin A. N., Neustroev P. V., Onegin M. S., Pirozhkov A. N., Polyshkin A. O., Prudnikov D. V., Ryabov V. L., Samoylov R. M., Sbitnev S. V., Fomin A. K., Cherniy A. V., Shoka I. V., Geltenbort P., Zimmer O., Gridnev K. A., Fomichev A. V., Dmitriev S. P., Dovator N. A., Martemyanov V. P., Petelin A. L. Programma issledovaniya fundamental'nykh vzaimodeystviy dl'ya reaktora PIK [Fundamental interactions research program for the PIK reactor]. *Nuclear Physics*, 2016, vol. 79, no. 3, pp. 187–197. (In Russian)
2. Serebrov A., Rudnev Yu., Murashkin A., Zhrebtsov O., Kharitonov A., Korolev V., Morozov T., Fomin A., Pusenkov V., Schebetov A., Varlamov V. Project of Neutron Beta-Decay A-asymmetry measurement with relative accuracy of $(1-2)\times 10^{-3}$. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2005, no. 4, pp. 383–387. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.110.057>
3. Doynikov N., Lamzin E., Sytchevsky S. On computation of 3-D magnetostatic fields of electrophysical apparatus magnet systems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1992, no. 28, pp. 908–911. <https://doi.org/10.1109/20.120025>
4. Belov A., Belyakova T., Filatov O., Kukhtin V., Lamzin E., Shatil N., Sytchevsky S., Gridnev K., Semchenkov A., Semchenkova O., Artukh A., Sereda Yu., Teterov Yu., Budzanowski A., Koscielniak F., Szmider J. Program package for accurate 3D reconstruction of magnetic fields from the boundary measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A*, 2003, no. 513, pp. 448–464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2003.07.004>
5. Arslanova D., Gavrish Yu., Gapionok E., Grosheva A., Knyazev N., Kukhtin V., Lamzin E., Nezhenzhev A., Ovsyannikov A., Ovsyannikov D., Sytchevsky S., Znamenshchikova N. Feasibility study of permanent magnet dipoles for SILA facility. *Cybernetics and Physics*, 2023, vol. 12, no. 4, pp. 252–256. <https://doi.org/10.35470/2226-4116-2023-12-4-252-256>
6. Belov A., Belyakova T., Kukhtin V., Lamzin E., Sytchevsky S., Filatov O. *Svidetel'stvo ob ofitsial'noi registratsii programmy dlia EVM no. 2003612492: Programmnyi kompleks dlia trekhmernogo rascheta statsionarnogo magnitnogo polia, analiza i sinteza magnitnykh sistem elektrofizicheskikh ustanovok (KOMPOT/M 1.0)*. Reestr programm dlia EVM [KOMPOT/M 1.0: computer code for 3D simulation of magnetostatic field in the analysis and synthesis of magnetic systems for electrophysical devices]. Russian Federation Computer Program Register. Registration Certificate no. 2003612492. Moscow, November 12, 2003.
7. Belov A., Belyakova T., Belyakov V., Kukhtin V., Lamzin E., Sytchevsky S., Filatov O. *Svidetel'stvo ob ofitsial'noi registratsii programmy dlia EVM no. 2003612494: Programmnyi kompleks dlia chislennogo modelirovaniia prostranstvennogo statsionarnogo raspredeleniia elektricheskikh tokov v geometricheski slozhnykh oblastiakh (KOMPOT/C 1.0)*. Reestr programm dlia EVM [KOMPOT/C 1.0: computer code for 3D simulation of stationary distribution of currents in regions of complex geometry]. Russian Federation Computer Program Register, Registration Certificate no. 2003612494. Moscow, November 12, 2003.
8. Belov A., Belyakova T., Belyakov V., Vassiljev V., Kukhtin V., Lamzin E., Sytchevsky S., Filatov O., Shatil N. *Svidetel'stvo ob ofitsial'noi registratsii programmy dlia EVM no. 2003612493: Programmnyi kompleks dlia chislennogo resheniia trekhmernykh statsionarnykh zadach teploprovodnosti (KOMPOT/T 1.0)*. Reestr programm dlia EVM [KOMPOT/T 1.0: computer code for 3D simulation of thermostatic fields]. Russian Federation Computer Program Register, Registration Certificate no. 2003612493. Moscow, November 12, 2003.
9. Diop Sh. Ya., Kaparkova M. V., Kukhtin V. P., Makarov A. A., Rodin I. Yu., Sytchevsky S. E., Firsov A. A. Razrabotka vychislitelnykh modelei dlia analiza magnitnogo polia v pomescheniakh meditsinskikh uchrezhdenii i gosptalei s tseliu normalizatsii ego urovnia. I. Iskazhenie geomagnitnogo polia [Numerical models for analysis and adjustment of magnetic field in medical centers. I. Simulation of geomagnetic field disturbances]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2022, vol. 18, iss. 3, pp. 365–378. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2022.306> (In Russian)
10. Amoskov V. M., Belov A. V., Belyakov V. A., Belyakova T. F., Gribov Yu. V., Kukhtin V. P., Lamzin E. A., Sytchevsky S. E. Computation technology based on KOMPOT and KLONDIKE codes for magnetostatic simulations in tokamaks. *Plasma Devices and Operations*, 2008, vol. 16, no. 2, pp. 89–103. <http://dx.doi.org/10.1080/10519990802018023>
11. Amoskov V., Belov A., Belyakov V., Belyakova T., Gapionok E., Garkusha D., Glukhikh M., Kukhtin V., Lamzin E., Maksimenkova N., Mingalev B., Sytchevsky S., Filatov O. *Svidetel'stvo ob ofitsial'noi registratsii programmy dlia EVM no. 2003612487: Programmnyi kompleks dlia rascheta magnitnykh sistem, soderzhashchikh magnitotverdye, magnitomiagkie i tokonesushchie elementy*

konstruktsii slozhnoi geometicheskoi formy (KLONDIKE 1.0). Reestr programm dlia EVM [KLONDIKE 1.0: computer code for 3D simulation of magnet systems of complex geometry with retentive and non-retentive materials and current carrying components]. Russian Federation Computer Program Register, Registration Certificate no. 2003612487. Moscow, November 12, 2003.

12. COMSOL Multiphysics®v.6.2. COMSOL®Software Version 6.2. Available at: <https://www.comsol.com/> (accessed: February 25, 2024).

13. Krasnikov G. E., Nagornov O. V., Starostin N. V. *Modelirovanie fizicheskikh protsessov s ispol'zovaniem paketa Comsol Multiphysics [Modeling of physical processes using the Comsol Multiphysics package]*. Moscow, National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute Press, 2012, 184 p. (In Russian)

14. Frenkel Ya. I. *Sobranie isbrannykh trudov. T. 1. Obshchaya teoriya elektrichestva [Selected works. Vol. 1. General theory of electricity]*. Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Press, 1956, 370 p. (In Russian)

15. Carpenter C. J. Theory and application of magnetic shells. *Proceedings of the IEEE*, 1967, vol. 114, no. 7, p. 995–1000.

16. Strang G., Fix G. *An analysis of the FE method*. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs Publ., 1973, 306 p.

17. Elleaume P., Chubar O., Chavanne J. Computing 3D magnetic field from insertion devices. *Proceedings of the 17th IEEE Particle Accelerator Conference (PAC'97)*. Vancouver, British Columbia, 1997, pp. 3509–3511. <https://doi.org/10.1109/PAC.1997.753258>

18. Chubar O., Elleaume P., Chavanne J. A 3D magnetostatics computer code for insertion devices. *Proceedings of the 6th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI'97)*. Himeji, Hyogo, Japan, 1997, pp. 481–484. <https://doi.org/10.1107/S0909049597013502>

19. Amoskov V. M., Belyakov V. A., Belyakova T. F. *Apparatno-programmnyi kompleks dlia izmereniia kharakteristik magnitnykh materialov v shirokom diapazone induktsii [Hardware and software package for measuring the characteristics of magnetic materials in a wide range of induction]*. Dubna, Joint Institute for Nuclear Research Publ., 2004, 19 p. (In Russian)

Received: August 11, 2024.

Accepted: October 4, 2024.

Authors' information:

Victor M. Amoskov — PhD in Physics and Mathematics; <https://orcid.org/0000-0001-9781-9116>, amoskov-sci@yandex.ru

Vyacheslav N. Vasiliev — <https://orcid.org/0000-0002-1218-6274>, vvnvm@mail.ru

Aleksandra D. Grosheva — <https://orcid.org/0009-0003-1242-314X>, a.d.grosheva@yandex.ru

Oleg A. Kovalchuk — <https://orcid.org/0009-0006-2911-7407>, kovalchuk@sintez.niiefa.spb.su

Vladimir P. Kukhtin — PhD in Physics and Mathematics; <https://orcid.org/0000-0001-6925-6141>, kukhtin-sci@yandex.ru

Evgeny A. Lamzin — Dr. Sci. in Physics and Mathematics; <https://orcid.org/0000-0002-6072-5711>, lamzin-sci@yandex.ru

Dmitrii D. Melnikov — <https://orcid.org/0009-0007-9265-9556>, dim.meln@yandex.ru

Aleksandr N. Murashkin — <https://orcid.org/0009-0001-9789-3268>, murashkin_an@pnpi.nrcki.ru

Dmitri A. Ovsyannikov — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor; <https://orcid.org/0000-0002-0829-2023>, dovs45@mail.ru

Anatoly P. Serebrov — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor; <https://orcid.org/0000-0002-6734-038X>, serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru

Sergei E. Sytchevsky — Dr. Sci. in Physics and Mathematics; <https://orcid.org/0000-0003-1527-4015>, sytch-sie@yandex.ru