

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

На правах рукописи

Луканов Арслан Дмитриевич

**Разработка и создание физической инфраструктуры для
прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа
с массой жидкого сцинтиллятора 5 тонн**

Специальность 1.3.2 —
«Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Лубсандоржиев Баярто Константинович

Москва — 2026

Оглавление

Стр.

Введение	4
Глава 1. Водные черенковские и жидкосцинтилляционные нейтринные детекторы и их инфракструктура	13
1.1 Kamiokande II	13
1.2 SNO	16
1.3 Borexino	18
1.4 SNO+	21
1.5 Double Chooz	22
1.6 Daya Bay	24
1.7 JUNO	25
1.8 Hyper-Kamiokande	30
Глава 2. Методы компенсации и экранирования магнитного поля	32
2.1 Измерение магнитного поля	32
2.2 Катушки Гельмгольца	36
2.3 Исследование влияния магнитного поля на параметры фотоэлектронных умножителей	38
2.4 Способы экранирования магнитного поля	51
2.5 Исследование характеристик ФЭУ при использовании магнитного экрана	56
2.6 Заключение к главе 2	57
Глава 3. Система компенсации магнитного поля для прототипа ББНТ с массой мишени 5 тонн	60
3.1 Проект Баксанского большого нейтринного телескопа	60
3.2 Конструкция прототипа ББНТ с массой мишени 5 тонн	61
3.3 Конфигурации системы магнитной компенсации	64
3.4 Выбор электрического кабеля	83
3.4.1 Электрический провод ВПП	83
3.4.2 Электрический кабель КВВ	84
3.4.3 Электрический кабель МСЭО	85
3.5 Расчет тепловыделения проводников	86

3.6	Монтаж системы компенсации магнитного поля	89
3.7	Заключение к главе 3	91
Глава 4. Разработка систем и методик очистки жидкого		
сцинтиллятора для прототипа ББНТ с массой		
мишени 5 тонн 93		
4.1	Линейный алкилбензол как основа жидкого сцинтиллятора и требования к его чистоте	93
4.2	Установка вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции . . .	96
4.2.1	Разработка методики очистки методом вакуумной дистилляции	97
4.2.2	Установка вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции	101
4.3	Хроматографическая очистка в колонне, заполненной оксидом алюминия	106
4.3.1	Разработка методики хроматографической очистки	107
4.3.2	Описание установки хроматографической очистки	120
4.4	Водная экстракция	122
4.4.1	Описание установки водной экстракции	126
4.4.2	Оптическая спектрометрия на индуктивно-связанной плазме	131
4.5	Сцинтилляционные свойства смесей линейного алкилбензола и додекана	132
4.5.1	Спектры излучения и поглощения	133
4.5.2	Световыход	135
4.5.3	Кинетика свечения	138
4.6	Заключение к главе 4	142
Заключение		144
Список литературы		146
Список рисунков		160
Список таблиц		164

Введение

Актуальность темы исследований и степень ее разработанности.

Жидкосцинтилляционные детекторы играют большую роль в экспериментах физики нейтрино и астрофизики частиц. Однако их эксплуатация сопряжена с рядом ограничений, связанных с воздействием внешних факторов, таких как внешние магнитные поля и химическое загрязнение сцинтиллятора, что существенно снижает точность и стабильность детектирования фотонов, которые рождаются в сцинтилляционной среде. В связи с этим вопросы компенсации магнитных полей и очистки жидких сцинтилляторов являются актуальными как с точки зрения совершенствования существующих технологий, так и для повышения чувствительности и надежности современных детекторов.

Внешние магнитные поля оказывают влияние на траектории движения фотоэлектронов при их прохождении их фотокатода до динодной системы фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), а также на траектории электронов при их движении в динодной системе. Данные отклонения приводят к ухудшению характеристик ФЭУ, таких как усиление, отношение Пик/Долина, эффективность регистрации фотонов, временные характеристики. Особенно критичным это становится в высокоточных современных экспериментах, например, энергетический спектр нейтрино измеряется путем подсчета общего количества фотоэлектронов при каждом взаимодействии нейтрино с сцинтиллятором детектора.

Таким образом, возможность выделения одного фотоэлектрона в зарядовом спектре является необходимым критерием при отборе фотоумножителей, использующихся в нейтринных детекторах. Для того, чтобы фотоэлектронные умножители имели возможность отличить однофотоэлектронные импульсы от шумовых сигналов, коэффициент усиления ФЭУ должен быть достаточно высоким, а пик однофотоэлектронного спектра быть достаточно узким, отношение Пик/Долина должно иметь максимально высокое значение.

Для нивелирования воздействия внешнего магнитного поля разрабатываются различные системы, включающие как активные, так и пассивные методы компенсации магнитного поля. Пассивные методы включают использование магнитных экранов, изолирующих фотоумножитель от внешних магнитных воздействий, такой метод находит широкое практическое применение ([1—7]).

Активные системы компенсации включают в себя установку катушек Гельмгольца и их разновидностей, которые создают противодействующие магнитные поля, нивелирующие эффект от внешних источников магнитных полей. Данный метод компенсации применяется во многих экспериментах, а также при изучении влияния магнитного поля на параметры ФЭУ ([8—13]). Эти подходы позволяют существенно снизить влияние магнитных полей на параметры ФЭУ.

Загрязнения жидких сцинтилляторов различными примесями - органическими и неорганическими - оказывает значительное влияние на их физико-химические свойства, что, в свою очередь, снижает эффективность детектирования и нарушает стабильность сигнала детектора. Важнейшей задачей является разработка и внедрение эффективных методов очистки жидких сцинтилляторов, что позволяет обеспечить долгосрочную стабильность работы детекторов и поддержание требуемых характеристик сцинтиллятора.

Основными загрязнителями являются растворенные металлы, органические вещества и продукты деградации сцинтиллятора. Современные методы очистки жидких сцинтилляторов включают физико-химические процессы, такие как фильтрация, сорбция, дистилляция и экстракция. В частности, широко применяются адсорбенты, способные эффективно удалять неорганические и органические загрязнители. Эффективность очистки непосредственно влияет на стабильность работы детектора и его способность поддерживать высокий уровень чувствительности в течение долгих периодов эксплуатации, так как наличие загрязнений в сцинтилляторе приводит к постепенной деградации характеристик. Влияние органических и неорганических примесей на характеристики сцинтиллятора также исследуется в работах [14—18]

Целью данной работы является разработка и создание системы компенсации магнитного поля для прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа с массой мишени 5 тонн, разработка и создание измерительных стендов для исследования влияния магнитного поля на параметры фотоэлектронных умножителей, исследование влияния естественного магнитного поля, а также искусственно создаваемого вдоль отдельных осей ФЭУ, на параметры фотоумножителей. Другими целями работы являются разработка и создание системы хроматографической очистки, системы вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции и системы водной экстракции для жидкого сцинтиллятора, который служит мишенью в 5-тонном и последующих прототипах Баксанского большого нейтринного телескопа, разработка методики очистки жидкого

сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола (ЛАБ), методики проверки качества очистки ЛАБ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать и создать систему компенсации магнитного поля для 5-тонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа.
2. Разработать и создать измерительный стенд для исследования влияния магнитного поля на параметры фотоумножителей.
3. Исследовать влияние естественного и искусственно создаваемого магнитного поля на параметры фотоумножителей.
4. Разработать и создать системы очистки жидкого сцинтиллятора для 5-тонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа.
5. Разработать методику хроматографической очистки, методику очистки методом вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции

Научная новизна: В рамках данной работы впервые в отечественной практике разработана и создана система компенсации магнитного поля для нейтринного детектора, которая позволяет снизить значения внешнего магнитного поля до около нулевых значений. Разработан и создан измерительный стенд для исследования влияния магнитного поля на параметры фотоэлектронных умножителей размерами до 20 дюймов, данный стенд позволяет компенсировать магнитное поле для трех компонент величиной до 1 Гс. Проведены исследования влияния магнитного поля на параметры фотоэлектронных умножителей. По результатам исследований показана необходимость использования системы компенсации магнитного поля в детекторе. Разработана и создана система хроматографической очистки, система вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции и система водной экстракции. Применение данных методов очистки позволяет достичь требуемой чистоты и оптических свойств жидкого сцинтиллятора.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в получении экспериментальных данных о влиянии внешнего магнитного поля на характеристики фотоэлектронных умножителей, применяемых в крупномасштабных нейтринных детекторах, а также в установлении зависимости эффективности очистки линейного алкилбензола от выбранного метода очистки и характеристик исходного растворителя. Полученные результаты позволяют определить требования к уровню компенсации

магнитного поля и параметрам технологических процессов очистки жидкого сцинтиллятора.

Практическая значимость работы заключается в разработке и создании физической инфраструктуры, необходимой для эксплуатации 5-тонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа. Разработанная система компенсации магнитного поля позволяет снизить магнитное поле в области расположения детектора с 0.3 Гс до 0.03 Гс. Разработанный измерительный стенд позволяет исследовать влияние магнитного поля на характеристики фотоэлектронных умножителей.

Разработанные системы вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции, хроматографической очистки и водной экстракции предназначены для получения жидкого сцинтиллятора с требуемыми оптическими и радиационно-физическими характеристиками. Разработанные методики очистки позволяют повысить длину ослабления света линейного алкилбензола, при этом для исследованных образцов длина ослабления после очистки достигала более 10 м. Разработанные установки вакуумной дистилляции и хроматографической очистки имеют производительность до 200 л/ч.

Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшей разработке и создании крупномасштабного детектора Баксанского большого нейтринного телескопа и детекторов нового поколения.

Методология и методы диссертационного исследования. Методологическую основу диссертационной работы составляет комплексный экспериментально-расчетный подход к разработке физической инфраструктуры жидкосцинтилляционного детектора. Исследование включает определение параметров магнитного поля, экспериментальное исследование его влияния на характеристики фотоумножителей, математическое моделирование разрабатываемой системы компенсации магнитного поля и экспериментальную проверку полученных результатов. При разработке систем очистки жидкого сцинтиллятора применялись методы вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции, хроматографической очистки с использованием оксида алюминия и водной экстракции. Эффективность очистки оценивалась по изменению оптических характеристик линейного алкилбензола, в том числе по спектрам поглощения и длине ослабления света. Дополнительно исследовались сцинтилляционные характеристики смесей линейного алкилбензола и n-додекана, включая световых выход, поглощение и кинетику сцинтилляционного свечения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка и создание системы компенсации магнитного поля для прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа с массой мишени 5 тонн
2. Разработка и создание измерительного стенда для исследования влияния магнитного поля на параметры фотоэлектронных умножителей
3. Результаты исследования влияния магнитного поля Земли и искусственного магнитного поля на параметры фотоумножителей
4. Разработка и создание системы хроматографической очистки, системы вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции, системы водной экстракции
5. Разработка методики хроматографической очистки, очистки методом вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции
6. Результаты исследования жидких сцинтилляторов на основе смесей линейного алкилбензола с n-додеканом

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается применением комплекса расчетных и экспериментальных методов исследования, проведением измерений непосредственно в области размещения прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа, а также экспериментальной проверкой разработанных технических решений. При разработке системы компенсации магнитного поля расчетные результаты были получены с учетом фактических значений магнитного поля в месте размещения детектора и особенностей его конструктивного исполнения. Экспериментальные измерения показали существенное снижение магнитного поля после установки системы компенсации: с 0.3 Гс до 0.03 Гс. Достоверность результатов исследования влияния магнитного поля на характеристики фотоэлектронных умножителей подтверждается сопоставлением результатов, полученных при воздействии естественного и искусственно создаваемого магнитного поля. При использовании системы компенсации изменение коэффициента усиления фотоумножителя было снижено с 22% до 1%, что подтверждает эффективность разработанного метода компенсации.

Достоверность результатов исследования очистки жидкого сцинтиллятора обеспечивается применением нескольких независимых характеристик качества очистки. Эффективность разработанных методов оценивалась по изменению оптических характеристик линейного алкилбензола, в том чис-

ле спектров поглощения и длины ослабления света. Полученные результаты показали возможность повышения длины ослабления света ЛАБ до требуемых значений. Дополнительным подтверждением достоверности результатов является воспроизводимость установленных закономерностей при исследовании различных образцов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлялись автором в устных и стендовых докладах на международных и российских конференциях:

1. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов 2021", 12-23 Апреля 2021, Москва, Россия
2. 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 29 Ноября - 3 Декабря 2021, Москва, Россия
3. 37-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 27 Июня - 2 Июля 2022, Москва, Россия
4. 6-th International conference on particle physics and astrophysics, 29 November - 2 December 2022, Moscow, Russia
5. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов 2023", 10-21 Апреля 2023, Москва, Россия
6. 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 3-8 Апреля, 2023, Москва, Россия
7. 7-th International conference on particle physics and astrophysics, 22-25 October 2024, Moscow, Russia
8. 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 1-6 Апреля, 2024, Москва, Россия
9. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов 2025", 11-25 Апреля 2025, Москва, Россия
10. LXXV Международная конференция "ЯДРО-2025". Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии", 1-6 Июля 2025, Санкт-Петербург, Россия

Личный вклад. Автором лично разработана система компенсации магнитного поля, получена оптимальная конфигурация системы, рассчитаны параметры установки. Также лично автором был создан измерительный стенд для исследования влияния магнитного поля на параметры фотоумножителей, был создан магнитометр на основе модуля НМС5883L, который позволяет проводить измерения магнитного поля до 8 Гс с точностью до 0.005 Гс. Автор лично

провел исследования влияния магнитного поля на параметры фотоэлектронных умножителей. Вклад автора имеет определяющее значение в разработке и создании системы хроматографической очистки, системы вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции и системы водной экстракции, предназначенных для очистки линейного алкилбензола. Автор разработал методику хроматографической очистки, очистки методом вакуумной дистилляции.

Публикации. Основные положения, выносимые на защиту, опубликованы в 10 статьях, входящих в список ВАК, индексируемых в базах Web of Science и SCOPUS:

- П.1 А. Д. Луканов, А. А. Будзинская, Д. М. Воронин, В. Н. Гаврин, Д. С. Гурский, Т. В. Ибрагимова, Б. К. Лубсандоржиев, С. Б. Лубсандоржиев, Д. А. Нанзанов, А. Ю. Сидоренков, Н. А. Ушаков, А. Н. Фазлиахметов, А. А. Шихин. Система компенсации магнитного поля Баксанского большого нейтринного телескопа. Журнал технической физики. 2025, том 95, №11, с. 2247-2255. DOI: 10.61011/JTF.2025.11.61609.30-25.
- П.2 A. D. Lukanov, A. A. Budzinskaya, V. N. Gavrin, D. S. Gursky, A. N. Fazliakhmetov, T. V. Ibragimova, B. K. Lubsandorzhiev, S. B. Lubsandorzhiev, D. A. Nanzanov, A. A. Shikhin, A. Yu. Sidorenkov, N. A. Ushakov, D. M. Voronin. Infrastructure of 5-ton Prototype of Baksan Large Neutrino Telescope Project. Physics of Atomic Nuclei. V 88, 1075-1081 (2025). DOI:10.1134/S1063778825601702.
- П.3 Lukanov A.D., Voronin D.M., Fazliakhmetov A. N., Veretyonkin E. P., Gangapshv A. M., Gavrin V. N., Ibragimova T. V., Kazalov V. V., Kuzminov V. V., Lubsandorzhiev B. K., Malyshkin Yu. M., Nanzanov

- D. A., Novikova G. Ya., Petkov V. B., Sidorenkov A. Yu., Smirnov O. Yu., Ushakov N. A., Shikhin A. A., Yanovich, E. A. Current Status of the Baksan Large Neutrino Telescope. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 87, 929–934 (2023). DOI: 10.3103/S1062873823702805.
- П.4 A. D. Lukanov, A. A. Budzinskaya, A. N. Gangapshev, V. N. Gavrin, A. N. Fazliakhmetov, T. V. Ibragimova, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, B. K. Lubsandorzhiev, Yu. M. Malyshkin, D. A. Nanzanov, G. Ya. Novikova, V. B. Petkov, A. A. Shikhin, A. Yu. Sidorenkov, O. Yu. Smirnov, N. A. Ushakov, E. P. Veretenkin, D. M. Voronin, E. A. Yanovich. Baksan Large Neutrino Telescope Project: Prototypes and Perspectives. *Phys. Atom. Nuclei* 86, 1380–1384 (2023). DOI:10.1134/S1063778823060182.
- П.5 A.Yu. Sidorenkov, A.A. Budzinskaya, A.N. Fazliakhmetov, D.S. Gursky, A.D. Lukanov, B.K. Lubsandorzhiev, S.B. Lubsandorzhiev, D.A. Nanzanov, N.A. Ushakov, D.M. Voronin. Characterization of scintillator mixtures based on n-dodecane and linear alkylbenzene. *Radiation physics and chemistry*. 2026 Vol. 239 P.113337. DOI:10.1016/j.radphyschem.2025.113337.
- П.6 Е. П. Веретенкин, В. Н. Гаврин, Б.А. Комаров, Ю. П. Козлова, А. Д. Луканов, В. П. Моргалюк, А. М. Немерюк, Г. Я. Новикова. Жидкие органические сцинтилляторы для регистрации редких событий, методы очистки от U, Th и K. *Ядерная физика*. 2022, том 85, №6, с. 459-467. DOI: 10.31857/S0044002722060149.
- П.7 N. Ushakov, A. Fazliakhmetov, V. Gavrin, T. Ibragimova, B. Lubsandorzhiev, A. Lukanov, A. Shikhin, A. Sidorenkov, D. Voronin. Evaluation of large area photomultipliers for use in a new Baksan Large Neutrino Telescope project. *PoS(ICRC2021)1101*. DOI: <https://doi.org/10.22323/1.395.1101>.
- П.8 N. Ushakov, A. Fazliakhmetov, A. Gangapshev, V. Gavrin, T. Ibragimova, M. Kochkarov, V. Kazalov, V. Kuzminov, B. Lubsandorzhiev, A. Lukanov, Y. Malyshkin, G. Novikova, V. Petkov, A. Shikhin, A. Sidorenkov, O. Smirnov, E. Veretenkin, D. Voronin, E. Yanovich. A new Baksan Large Neutrino Telescope: the project's status. *PoS(ICRC2021)1188*.
- П.9 S. Lubsandorzhiev, A. Sidorenkov, B. Lubsandorzhiev, S. Ponomarenko, N. Surin, O. Borshev, N. Ushakov, N. Lubsandorzhiev, D. Voronin, A.

Lukanov, A. Fazliakhmetov. Development of new liquid scintillators for neutrino experiments of next generation. PoS (ICRC2019).

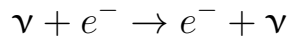
- П.10 A.Yu. Sidorenkov, O.V. Borshchev, A.A. Budzinskaya, A. N. Fazliakhmetov, B. K. Lubsandorzhiev, S. B. Lubsandorzhiev, A.D. Lukanov, D. A. Nanzanov, M. S. Skorotetcky, N. M. Surin, E. A. Svidchenko, N. A. Ushakov, D. M. Voronin. Research and Development of Highly Efficient Liquid scintillators. Physics of Atomic Nuclei. 2023 Vol. 87 N. 1 P. 347-350. doi: 10.1134/S1063778824010514.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 0 приложений. Полный объём диссертации составляет 165 страниц, включая 72 рисунка и 20 таблиц. Список литературы содержит 127 наименований.

Глава 1. Водные черенковские и жидкосцинтилляционные нейтринные детекторы и их инфракструктура

1.1 Kamiokande II

Эксперимент Kamiokande был разработан для проверки теории Великого объединения посредством поиска распада протона. Обсерватория Камиока была основана в 1983 году. В последствии в 1986 году детектор был модифицирован для наблюдения солнечных нейтрино [19]. Установка представляет собой водный черенковский детектор, использующий реакцию упругого рассеяния нейтрино на электронах воды:



нейтрино упруго рассеивается на электроны в молекуле воды, выбивая его. Далее этот электрон регистрируется по излучению Черенкова, которое он испускает, двигаясь в воде. Такая методика позволяет регистрировать нейтрино всех ароматов, хотя наибольшую чувствительность она имеет к электронным нейтрино. Важным преимуществом такой методики является возможность достаточно точно определить направление нейтрино, поскольку выбитый электрон сохраняет первоначальное направление движения. Водный резервуар детектора представляет собой цилиндр диаметров 15.5 м и высотой 16 м. Масса воды составляет 3000 тонн. Черенковский свет регистрируется 1000 20-дюймовых ФЭУ, которые установлены на внутренних стенках водного резервуара. ФЭУ располагаются равномерно таким образом, что покрытие внутренней поверхности составляет 20% [20]. Для регистрации солнечных нейтрино необходимо было реализовать две основные модификации по сравнению с первым этапом эксперимента: создание системы антисовпадений для устранения фоновых сигналов, также понадобилось усовершенствование системы регистрации данных [21]. Значения естественного магнитного поля Земли в обсерватории Камиока составляет 300 мГс, для устранения влияния магнитного поля применяются два независимых метода. Первый заключается в использовании двух магнитных экранов для каждого ФЭУ (Рис. 1.1), передний экран представляет собой полусферическую сетку, которая покрывает фотокатод, из μ -металла с 78%

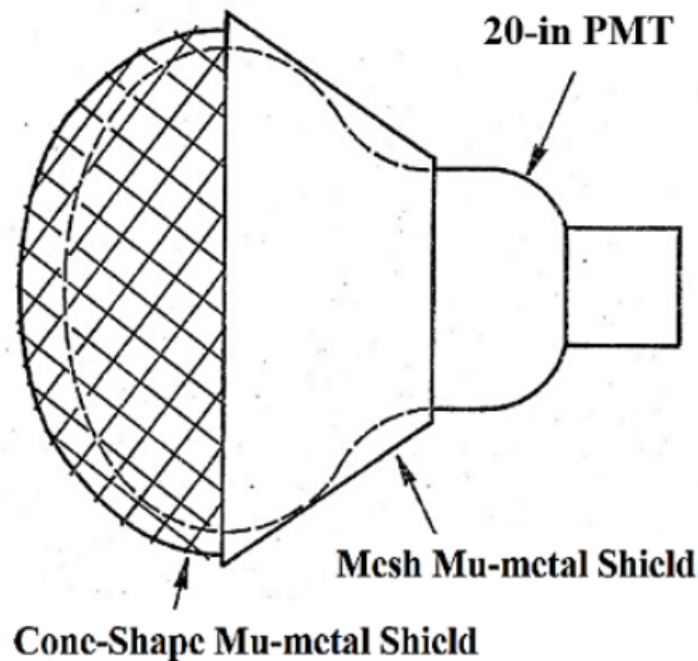


Рисунок 1.1 — Магнитный экран в эксперименте Kamiokande [22].

содержанием никеля, которая пропускает 88% света. Задний экран толщиной 0.35 мм закрывает диодную систему ФЭУ и представляет собой конус, также выполненный из μ -металла. Общий коэффициент экранирования варьируется от 3 до 8 в зависимости от ориентации фотоумножителя в пространстве. Также в детекторе использовалась система компенсации магнитного поля, расположенная вокруг всего водного резервуара, таким образом, с учетом двух методов магнитное поле внутри ФЭУ не превышало 30 мГс, усиление каждого фотоумножителя не изменялось более, чем на 3% [22]. Порог чувствительности установки составил 7.5 МэВ. За 1000 дней работы детектора доля экспериментально обнаруженных нейтрино от теоретически предсказанных составила $0.46 \pm 0.13(\text{стат.}) \pm 0.08(\text{сист.})$ [23].

Super-Kamiokande является продолжением Kamiokande II, начатым в 1996 г. Детектор располагается в шахте Мозуми компании Камиока, в Японии, на глубине 1000 м (2700 м.в.э.). Super-Kamiokande представляет собой водный черенковский детектор, который содержит 50 ктонн ультрачистой воды. Внутри резервуара расположен каркас, на котором крепятся ФЭУ внутреннего и внешнего детекторов. Внутренний детектор просматривается 11000 фотоумножителей диаметром 20 дюймов, покрытие мишени составляет 40% [24]. Внутренняя зона детектора окружена слоем воды, который служит защитой от естественной радиоактивности окружающих горных пород, а также в каче-

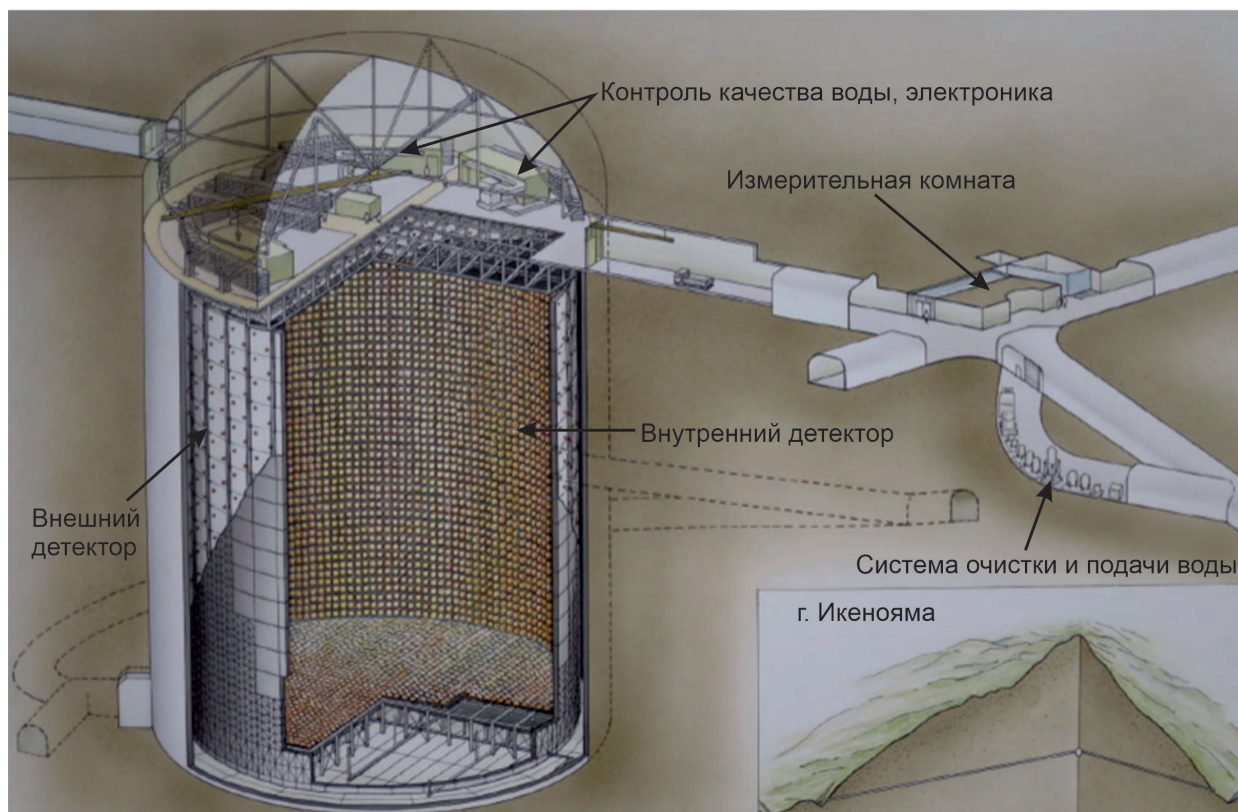


Рисунок 1.2 — Схема детектора Super-Kamiokande [24].

стве активной системы мюонного вето. Для внешнего детектора используются 1885 20-сантиметровых ФЭУ Hamamatsu R1408. Внешняя и внутренняя зоны детектора оптически разделены специальной светонепроницаемой пленкой. На рисунке 1.2 показана схема детектора Super-Kamiokande.

Изначально вода из основного резервуара пропускается через механические фильтры с размерами пор 1 мкм для удаления пыли и других частиц, которые снижают длину ослабления света воды, а также являются источником радона. Далее вода проходит через теплообменник, который используется для охлаждения воды, чтобы снизить уровень шумов темнового тока ФЭУ и подавить рост бактерий, снижающих длину ослабления света воды. Оставшиеся бактерии удаляются на этапе УФ-стерилизации. Типичные температуры воды до первого теплообменника и после второго составляют 14,2°C и 12,9°C соответственно. Следующим идет финишный ультрафильтр, с помощью которого устраняются тяжелые ионы, снижающие длину ослабления света воды и содержащие радиоактивные частицы. Объем используемой смолы в фильтре составляет 1500 л. Первоначально в систему очистки воды была включена ионообменная колонна, однако было обнаружено, что смола в этой колонне является значительным источником радона, поэтому ее удалили. Также вода проходит

через вакуумный дегазатор для удаления растворенных газов, в особенности радона. Эффективность удаления радона составила 96% [25]. Компенсация магнитного поля осуществляется с помощью катушек Гельмгольца.

Работа детектора разделена на 4 фазы. Первая фаза продолжалась с апреля 1996 г. по июнь 2001 г. Вторая и третья фазы проходили с 2002 по 2005 гг. и с 2006 по 2008 гг. соответственно. Последняя 4 фаза продолжалась с сентября 2008 года по май 2018 г. Общая продолжительность работы детектора составила 5805 лней. Изначальный порог детектора составлял 7.5 МэВ, однако в 2015 году порог был снижен до 3.5 МэВ, в результате измеренный поток от распада ${}^8\text{B}$ составил $(2.314 \pm 0.014(\text{стат.}) \pm 0.040(\text{сист.})) \times 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что находится на уровне 47% от предсказанного потока для ССМ [26]. Таким образом, существование дефицита нейтрино от солнца было экспериментально подтверждено.

1.2 SNO

Нейтринная обсерватория в Садбери была основана главным образом для того, чтобы дать окончательный ответ на проблему солнечных нейтрино. Начиная с первых расчетов потока солнечных нейтрино, выполненных Джоном Бакхоллом, и первых измерений Дэвиса в 1960-х годах, было известно о расхождении между наблюдаемыми потоками и теоретическими предсказаниями. в 1984 году была сформирована международная коллаборация из 16 канадских и американских ученых под руководством Чена и Юэна. Эксперимент SNO уникален тем, что он способен обнаруживать солнечные нейтрино помимо упругого рассеяния на электроны еще двумя способами:

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- - \text{заряженный ток, СС}$$

$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x - \text{нейтральный ток, НС}$$

Значительный дефицит потока ${}^8\text{B}$ нейтрино, измеренный реакцией СС, по сравнению с измеренным реакцией НС, напрямую продемонстрировал бы, что электронные нейтрино Солнца изменялись на один из двух других типов, без

ссылки на солнечные модели. В то же время реакция NC обеспечила измерение полного потока солнечных нейтрино 8B независимо от изменения аромата нейтрино.

Детектор был расположен на глубине 2 км под землей в действующей никелевой шахте, расположенной недалеко от Садбери, Онтарио, Канада. Центральным элементом детектора являлось 1000 тонн тяжелой воды ($>99.5\%$ изотопной чистоты), предоставленной компанией AECL и помещенной в прозрачный акриловый сосуд диаметром 12 метров с толщиной стенки 5 см. Мишень просматривалась 9438 ФЭУ Hamamatsu R1408, установленными на опорной раме из нержавеющей стали. Каждый ФЭУ был оснащен концентратором света диаметром 27 см. для увеличения эффективного покрытия до 54%. Еще 91 фотоумножитель был установлен так, чтобы просматривать внешнюю область детектора. Вся полость снаружи акрилового сосуда заполнена 7000 тоннами сверхчистой обычной воды. Для тяжелой воды из мишени содержание элементов из радиоактивных цепочек урана и тория должны быть ниже 10^{-14} г/г, в то время как для воды из внешней зоны – 10^{-13} г/г. Основными компонентами системы очистки являются установка обратного осмоса, установки фильтрации, ионообменные фильтры, УФ-стерилизация и вакуумная дегазация. Помимо этого, разработаны фильтры на основе свинца и оксида марганца для извлечения производных урана и тория [27].

Детектор оснащен системой компенсации магнитного поля для устранения его влияния на параметры фотоумножителей. Значения магнитного поля для горизонтальной составляющей равны 0.3 Гс, для вертикальной - 0.5 Гс. При расчете параметров системы компенсации каждая катушка разбивалась на отрезки длиной 30 см, далее для каждого отрезка рассчитывалось создаваемое им магнитное поле. Затем магнитное поле от всех отрезков суммировалось для получения полного создаваемого магнитного поля для каждого положения ФЭУ. По результатам расчетов была получена оптимальная конфигурация системы компенсации, в которой для компенсации вертикальной компоненты используются 53 катушки по 20 витков в каждой, расположенные в горизонтальных плоскостях вдоль стенок цилиндра, с расстоянием от 40 до 70 см между катушками. 58 параллельных катушек компенсируют горизонтальную составляющую. Расстояние между кольцами также составляет от 40 до 70 см. Остаточное магнитное поле находится на уровне 8.1% от изначального для вертикальной компоненты, для горизонтальной – 7.1% [28].

Реакции CS и NC регистрировались по черенковскому излучению, испускаемому электронами. В то же время способ регистрации нейтронов, возникающих в результате NC взаимодействий, отличался на разных этапах эксперимента. В первой фазе нейтроны фиксировались по гамма-квантам, испускаемым при реакции захвата нейтрона дейтерием. Во второй фазе применялся аналогичный подход, но захват происходил хлором ^{35}Cl , растворенным в тяжелой воде в виде соли NaCl . При этом эффективное сечение захвата увеличивалось в 500 раз, а энергия гамма-квантов также возрастала. На третьем этапе регистрация нейтронов осуществлялась с помощью пропорциональных счетчиков, установленных внутри мишени и заполненных изотопами гелия.

По результатам анализа полученных данных было доказано явление осцилляций нейтрино, это объяснило дефицит солнечных нейтрино, наблюдаемый ранее. Было показано, что общий поток нейтрино от солнца соответствует предсказаниям стандартной модели [29].

1.3 Borexino

Водные эксперименты имеют высокий порог чувствительности, самый низкий порог был на уровне 3.5 МэВ в эксперименте Super-Kamiokande. Следующим этапом в развитии нейтринных экспериментов стали детекторы с мишенью из жидкого сцинтиллятора, что позволило снизить порог. Одним из таких детекторов стал Borexino. Детектор располагается в национальной лаборатории Гран-Сассо в Италии на глубине 3800 м.в.э. и был запущен в работу в 2007 г. Основной целью эксперимента является регистрация ^7Be нейтрино с энергией 0.862 МэВ с помощью реакции упругого рассеяния нейтрино на электроны жидкого сцинтиллятора. Порог детектора составляет 250 кэВ, а общее предсказанное количество событий в день составляет 50 в соответствии с ССМ.

Поскольку исследуемый низкоэнергетический диапазон в значительной степени определяется естественным фоном, детектор BOREXINO был разработан как многоступенчатый экранированный детектор: по мере приближения к чувствительному объему детектора последовательно устанавливаются более низкие уровни собственной радиоактивности. Внутреннее строение установки представляет собой сферу из нержавеющей стали радиусом 6.85 м, на которой

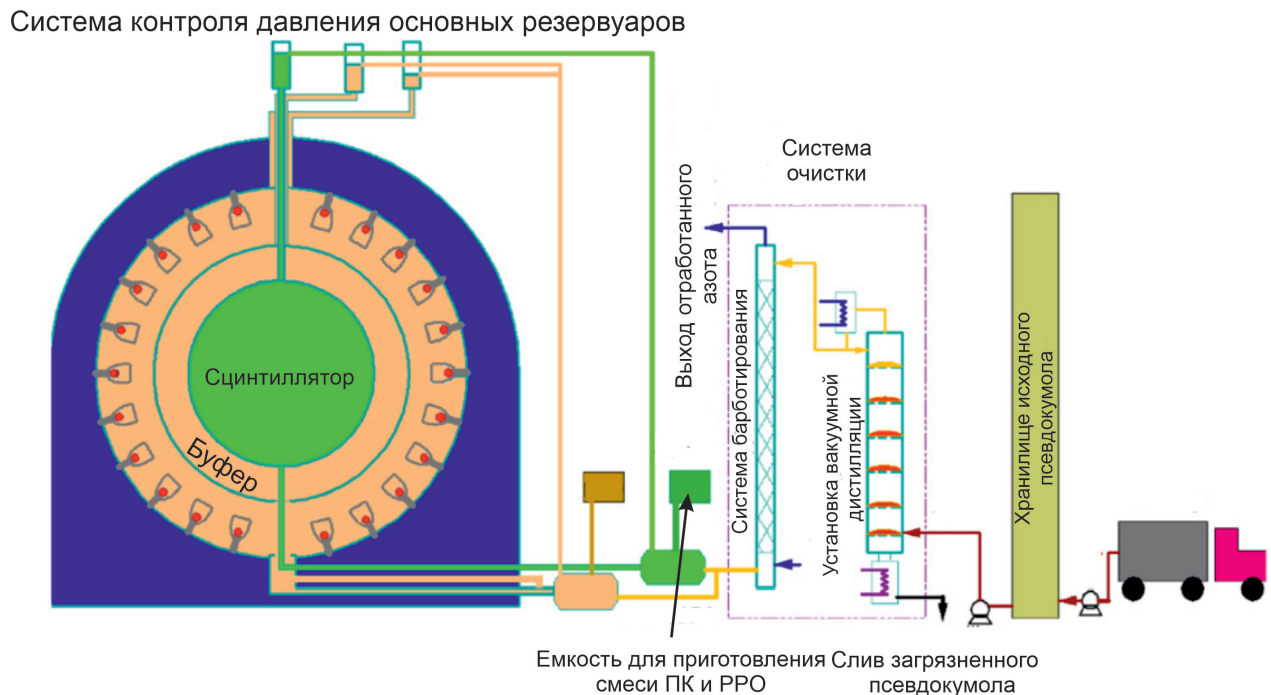


Рисунок 1.3 — Общий вид детектора Vorexino и его система очистки [30].

расположены 2112 ФЭУ, расположенных равномерно на внутренней поверхности сферы. Внутри стального резервуара расположены две нейлоновых сферы радиусом 4.25 и 5.5 м. Внутренняя сфера содержит жидкий сцинтиллятор на основе псевдокумола ($C_6H_3(CH_3)_3$) с массой 278 тонн, в качестве сцинтилляционной добавки используется РРО (2.5 дифенилоксазол, $C_{15}H_{11}NO$) в концентрации 1.5 г/л. Внешняя нейлоновая и стальная сферы заполнены псевдокумолом с добавлением диметилфталата в концентрации 5 г/л для подавления остаточного сцинтилляционного света от чистого псевдокумола. Буферные зоны играют роль защиты от внешней радиоактивности, а также предотвращают попадание радона в основной сосуд. Наконец, весь детектор находится в резервуаре (радиус 9 м, высота 16.9 м), заполненном сверхчистой водой. Общая пассивная защита центральной зоны от внешнего излучения составляет, таким образом, 5.5 м водного эквивалента (м.в.э.). Общий вид детектора и система очистки показаны на рисунке 1.3 [30].

Процесс очистки жидкого сцинтиллятора решено было сделать постоянным для минимизации затрат на хранение псевдокумола. Первый этап очистки является вакуумная дистилляция, которая является самым эффективным методом для увеличения длины ослабления света сцинтиллятора. В результате очистки длина ослабления света на длине волны 320 нм увеличилась



Рисунок 1.4 — Магнитный экран ФЭУ в детекторе Bogexino [32].

с 1 до более, чем 10 м. Следующим этапом идет барботирование псевдокумола азотом для удаления таких элементов, как Ar, Kr и Rn. После двух данных этапов очистки жидкий сцинтиллятор заливался в центральный объем детектора, однако, система предполагает другие этапы очистки в случае если качество сцинтиллятора не удовлетворяет предъявляемым требованиям. В этом случае предусмотрены две стратегии доочистки сцинтиллятора: водная экстракция с последующим барботированием или разложение сцинтиллятора на псевдокумол и РРО с последующей их отдельной очисткой [31].

Все ФЭУ детектора оснащены магнитными экранами, выполненными из μ — металла длиной 35 см и диаметром 24 см, толщина экрана составляет 0.5 мм (Рис. 1.4).

В результате детектором Bogexino были измерены потоки ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, $\text{p}\bar{\text{e}}\text{r}$, а также $\text{p}\bar{\text{p}}$ -нейтрино, которые совпали с потоками, предсказанными в ССМ.

1.4 SNO+

Сбор данных в эксперименте SNO проводился с 1999 по 2006 годы. Используя большую часть оригинального оборудования SNO, эксперимент SNO+ проводился в три фазы, которые различались веществом мишени, каждая из которых имела разнообразную и взаимодополняющую экспериментальную программу. На первой, «водной», фазе детектор SNO+ был первоначально заполнен легкой водой в мае 2017 года. Для второй фазы внутренний объем детектора был заполнен 780 тоннами органического жидкого сцинтиллятора. Это увеличило световой выход примерно в 50 раз по отношению к воде, что позволило изучать фундаментальные физические процессы при более низких энергиях и с большим разрешением. Наконец, для третьей рабочей фазы сцинтиллятор будет загружен 3.9 тоннами природного теллура для поиска двойного безнейтринного бета-распада [33]. Основной целью эксперимента является поиск двойного безнейтринного бета-распада. Помимо этого, детектор SNO+ будет чувствителен к солнечным нейтрино, геонейтрино, реакторным нейтрино, а также нейтрино от сверхновых.

По сравнению с водой жидкие органические сцинтилляторы обладают рядом преимуществ. В жидком органическом сцинтилляторе может быть достигнут низкий уровень урана, тория и калия, так как их ионы плохо растворяются в неполярных органических молекулах. Во-вторых, жидкие сцинтилляторы имеют быстрый временной отклик порядка наносекунд. В-третьих, они характеризуются хорошей линейностью энергетического отклика. Наконец, разработаны методики для загрузки различных элементов в жидкие сцинтилляторы. Растворимость тяжелых металлов в сцинтилляторе была одним из условий для общей разработки эксперимента. Основой жидкого сцинтиллятора в эксперименте SNO+ является линейный алкилбензол (ЛАБ), ввиду его совместимости с акрилом, хороших оптических свойств, низкой стоимости и доступности. В качестве сцинтилляционной добавки используется РРО в концентрации 2 г/л [34].

Очистка сцинтиллятора осуществлялась с помощью нескольких методов: многоступенчатая вакуумная дистилляция, водная экстракция, барботирование. Дистилляция проводилась отдельно для линейного алкилбензола и РРО. РРО подавался в колонку в виде раствора с ЛАБ. Производительность систе-

мы вакуумной дистилляции составила 1 т/ч. Водная экстракция эффективно показывает себя в удалении ионов тяжелых металлов таких, как уран, торий, калий и висмут. Однако этот метод очистки почти не влияет на оптические показатели сцинтиллятора, так как на эти характеристики влияют, как правило, неполярные окисленные органические загрязнения. Производительность установки составляла 150 литров в минуту, ЛАБ нагревался до 80°C для повышения производительности. После водной экстракции производилось барботирование сцинтиллятора. Данная процедура помимо удаления благородных газов также удаляет остаточную воду, которая попала в ЛАБ после водной экстракции. Эффективность удаления радона составила 95%. Для удаления тяжелых металлов, таких как свинец и радий использовались поглотители металлов, которые используются в фармацевтике. Основанием для разработки этого метода очистки является обеспечение альтернативного и дополнительного метода после водной экстракции. В эксперименте SNO+ в качестве активного вещества использовалось QuadraSil-AP, которое в своем составе имеет аминопропиловую группу в узлах сетки силикагеля. Абсолютный световыход сцинтиллятора до очистки составил 11900 ± 600 фотонов/МэВ. После проведения очистки световыход вырос на 15%. Длина поглощения света после очистки составила 12 м [35].

Теллур был добыт и доставлен под землю в виде теллуровой кислоты (TeA) и переработан на специально построенной установке очистки TeA. Очищенный TeA затем подвергнется реакции конденсации с 1,2-бутандиолом на установке синтеза бутандиола, при этом полученный водный продукт испаряется и удаляется. Полученный комплекс теллура-бутандиола (TeBD) затем растворяется в ЛАБ [33].

Мишень просматривается 9300 20-сантиметровых ФЭУ, на которых установлены концентраторы света. Площадь покрытия мишени составляет 54% [36].

1.5 Double Chooz

Эксперимент Double Chooz (DC) был создан для изучения свойств нейтринных осцилляций вблизи ядерных реакторов [37; 38]. Регистрация нейтрино происходит через реакцию обратного бета-распада с помощью свободных протонов в жидком органическом сцинтилляторе мишени. В частности, он был

разработан для поиска наименьшего угла смешивания θ_{13} . Знание этого фундаментального параметра в физике элементарных частиц имеет решающее значение для определения других параметров осцилляций, таких как CP-нарушающая фаза [39]. Double Chooz - это эксперимент, состоящий из двух идентичных детекторов, который находится в окрестностях АЭС Шо во Франции. Ближний детектор располагается в 400 метрах от АЭС на глубине 120 м.в.э. Дальний детектор находится на расстоянии 1050 м. от атомной станции на глубине 300 м.в.э. [40]. Так как дальний детектор был установлен в уже существующей лаборатории первого эксперимента CHOOZ [41], сбор данных этой установкой начался с 2011 г. Второй детектор начал свою работу в 2014 году. Параллельная работа двух детекторов проходила в течение трех лет, после чего в 2017 году сбор данных был окончен [42].

Структура обоих детекторов состоит из нескольких основных частей: внутренний детектор, внутреннее вето, внешнее вето, экранировка и калибровочная система. Внутренний детектор состоит из трех концентрических цилиндров, центральная зона, выполненная из акрила, объемом 10 м^3 служит мишенью для антинейтрино и заполнена жидким сцинтиллятором на основе фенил-ксилил-этана с добавлением гадолиния в концентрации 4.5 г/л. Средняя зона, окружающая мишень, также изготовлена из акрила и заполнена жидким сцинтиллятором без добавления гадолиния. Объем этой части составляет 22.5 м^3 , и изначальная задача этой зоны состояла в регистрации гамма-излучения от мишени для калориметрии. Однако нейтринные взаимодействия, происходящие в этом объеме, также могут быть включены в нейтринный анализ, увеличивая целевой объем детектора примерно в 3 раза [43]. Внешняя зона внутреннего детектора имеет объем более 100 м^3 , заполнена минеральным маслом и служит для защиты от внешней радиоактивности. Мишень просматривается 390 10-дюймовыми фотоумножителями, которые установлены на внутренней стенке буферной зоны. Поток мюонов составляет $(3.64 \pm 0.04) \times 10^{-4} (\text{см}^2 \times \text{с})^{-1}$ в лаборатории ближнего детектора и $(7.00 \pm 0.05) \times 10^{-5} (\text{см}^2 \times \text{с})^{-1}$ в лаборатории дальнего детектора [44].

Цилиндр из нержавеющей стали, окружающий внутренний детектор, заполнен 90 м^3 жидкого сцинтиллятора и, в основном, используется в качестве системы мюонного вето. Дальний детектор покрыт листами размагниченной стали толщиной 15 см, ближний детектор окружен слоем воды толщиной 1 м. Внешний стальной экран окружал дальний детектор постоянного тока. Сталь-

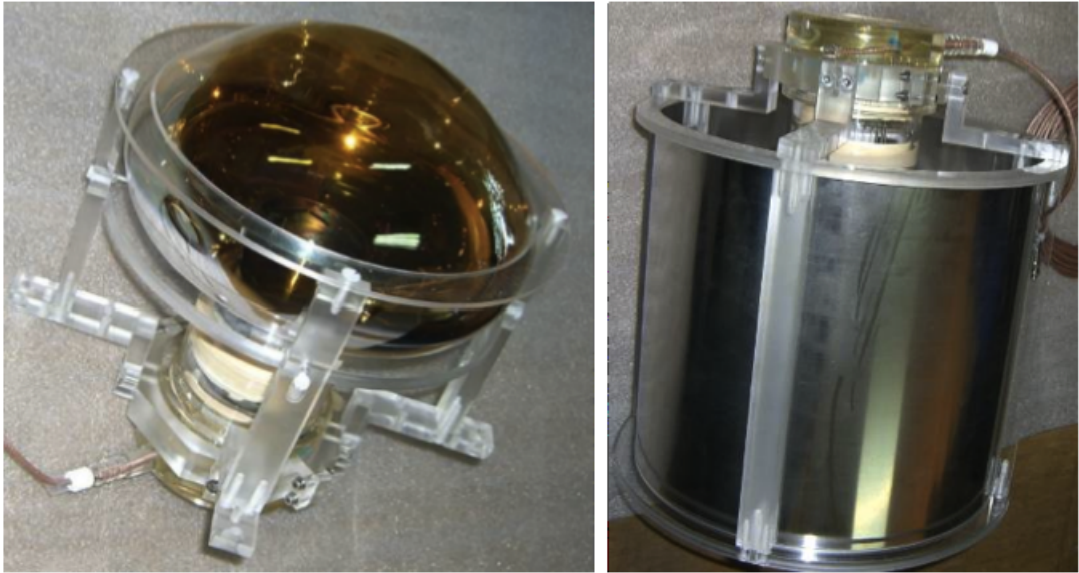


Рисунок 1.5 — Магнитный экран ФЭУ в детекторе Double Chooz [42].

ные детали были размагничены с целью получения магнитного поля внутри детектора ниже 0.5 гаусс. Однако эффективный уровень магнитного поля и его направление после закрытия детектора были неизвестны и, как ожидалось, различались для дальнего и ближнего детекторов, поскольку ближний детектор не имел внешнего стального экрана.

Для устранения влияния остаточного магнитного поля на параметры ФЭУ были разработаны магнитные экраны. Экран имеет цилиндрическую форму и выполнен из мю-металла толщиной 0.5 мм, высотой 275 мм и внутренним диаметром 300 мм. Экран выступает на 5.5 см от самой высокой точки ФЭУ, тем самым не перекрывая попадающий на фотокатод свет (Рис. 1.5). После изготовления экран подвергался отжигу в течение 3 часов при температуре 1080°C для придания материалу высокой магнитной проницаемости.

1.6 Daya Bay

Нейтринный реакторный эксперимент Daya Bay состоит из 8 идентичных детекторов антинейтрино и служит для измерения угла смешивания θ_{13} путем поиска дефицита электронных антинейтрино в зависимости от расстояния до ядерного комплекса [45]. Детекторы расположены в трех экспериментальных залах на глубине 250, 265 и 860 м.в.э. Атомная электростанция Даявань рас-

полагается на южном побережье Китая в 45 км к востоку от г. Шенчжэнь. АЭС включает в себя 6 реакторов, расположенных попарно. Общая тепловая мощность 6 реакторов составляет 2.9 ГВт [46], создавая около 35×10^{20} антинейтрино в секунду. Каждый детектор антинейтрино состоит из трех цилиндров, вложенных друг в друга. Центральная зона, служащая мишенью для антинейтрино, содержит 20 тонн жидкого сцинтиллятора, легированного гадолинием до содержания 0.1%. Центральный объем заполнен нелегированным жидким сцинтиллятором массой 20 т и служит для регистрации гамма-излучения от мишени. Внешний объем содержит 37 т минерального масла для обеспечения оптической однородности и защиты внутренних объемов от излучения от компонентов детектора.

Во внешнем объеме и по окружности сосуда из нержавеющей стали установлено 192 8-дюймовых ФЭУ (Hamamatsu R5912). Верхняя и нижняя поверхности не оснащены ФЭУ, вместо этого имеются две отражающие панели. Фотоумножители оснащены магнитными экранами, выполненными из материала FINEMET с высокой магнитной проницаемостью [47]. Каждый детектор погружен в водный резервуар, который обеспечивает слой воды толщиной 2.5 м для снижения излучения от окружающих горных пород. Водный бассейн оптически разделен на внутреннюю и внешнюю области, которые оборудованы 8-дюймовыми ФЭУ и служат в качестве водных черенковских детекторов.

1.7 JUNO

Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO) является крупнейшим жидкосцинтилляционным детектором на данный момент. Это многоцелевой детектор, целями которого являются: определение иерархии масс нейтрино, точное измерение параметров осцилляций нейтрино, обнаружение нейтрино от сверхновой, Солнца и Земли и т.д [48]. К центральной зоне детектора, которая является мишенью, предъявляются высокие требования такие, как большой объем и масса мишени, высокое энергетическое разрешение, большая длина ослабления света, максимально возможное покрытие поверхности центральной зоны фотоумножителями, минимально возможный радиоактивный фон.

Конструкция детектора состоит из двух зон. Центральная зона представляет собой акриловую сферу с внутренним диаметром 35.4 м, которая заполнена жидким сцинтиллятором массой 20 килотонн. Основу жидкого сцинтиллятора составляет линейный алкилбензол (ЛАБ) с добавлением РРО с концентрацией 2.5 г/л в качестве сцинтилляционной добавки. Также в качестве спектр сдвигающей добавки присутствует bis-MSB [49]. Сфера установлена на каркасе из нержавеющей стали. Мишень просматривается 18000 20-дюймовых ФЭУ и 25000 3-дюймовых ФЭУ, которые установлены на внутренней поверхности каркаса, поддерживающего акриловую сферу. Покрытие мишени составляет 75.2% для 20-дюймовых ФЭУ и 2.7% для 3-дюймовых фотоумножителей [50]. Акриловая сфера погружена в водный резервуар высотой 44 м и диаметром 43.5 м, который заполнен ультрачистой водой массой 35 кт. Резервуар служит в качестве защиты от внешней радиоактивности, а также в качестве черенковского детектора для мюонного вето. Черенковский свет, создаваемый мюонами, проходящими через водный объем, регистрируется 2400 20-дюймовыми ФЭУ с микроканальными пластинами. Фотоумножители установлены на внешней поверхности каркаса черенковского детектора. Внешняя зона детектора покрыта светоотражающим материалом Tyvek для повышения эффективности светосбора.

Обсерватория находится недалеко от города Цзянмэнь, Китай, с широтой 22.127 градуса северной широты и 112.517 градуса восточной долготы. По данным IGRF интенсивность геомагнитного поля горизонтальной компоненты в месте расположения детектора составляет 380.18 мГс и 237.72 мГс для вертикальной компоненты. Наклонение магнитного поля составляет 32° [51]. Основное требование, предъявляемое к системе компенсации магнитного поля, состоит в ослаблении геомагнитного поля до 10% от изначальной интенсивности для ФЭУ, окружающих мишень. Для ФЭУ черенковского детектора магнитное поле компенсируется до значений в 20% от изначальной интенсивности поля [52]. Расчет создаваемого катушками магнитного поля ведется по формуле Био-Савара-Лапласа. При численном расчете катушка делится на 1000 частей, каждая из которых рассматривается как небольшая прямая линия, а интегрирование линии выполняется с применением формулы Гаусса-Лежандра:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{q=1}^n \frac{a}{r_{pq}^3}$$

$$\begin{aligned}
a &= a_x l^\wedge + a_y j^\wedge + a_z k^\wedge \\
a_x &= \Delta z_{pq} w(y_q) - \Delta y_{pq} w(z_q) \\
a_y &= \Delta x_{pq} w(z_q) - \Delta z_{pq} w(x_q) \\
a_z &= \Delta y_{pq} w(x_q) - \Delta x_{pq} w(y_q) \\
r_{pq} &= \sqrt{\Delta x_{pq}^2 + \Delta y_{pq}^2 + \Delta z_{pq}^2}
\end{aligned}$$

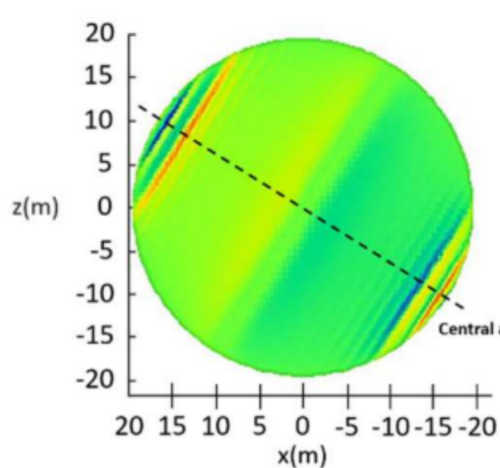
где $\Delta x_{pq} = x_p - x_q$, $\Delta y_{pq} = y_p - y_q$, $\Delta z_{pq} = z_p - z_q$, $(x_q; y_q; z_q)$ – координаты секции катушки, а $(x_p; y_p; z_p)$ – координаты, в которых оценивается генерируемое магнитное поле, I – сила тока, протекаемого в катушке, A ; а $w(x_q), w(y_q), w(z_q)$ – веса, заданные в декартовых координатах в формуле Гаусса-Лежандра. Минимальное количество катушек, интервалы между двумя соседними катушками и ток каждой катушки оптимизируются для удовлетворения предъявляемых требований. Остаточная интенсивность магнитного поля (RI) определяется как

$$RI = \frac{\sqrt{(B_x - EMF_x)^2 + (B_y - EMF_y)^2 + (B_z - EMF_z)^2}}{EMF} \times 100\%$$

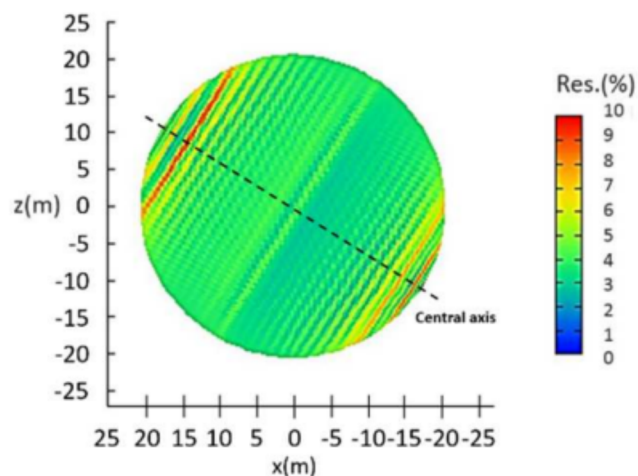
где EMF, EMF_x, EMF_y, EMF_z – это абсолютное значение, северная, восточная и вертикальная компоненты геомагнитного поля соответственно, а индукция магнитного поля, создаваемая катушками, задаются как B_x, B_y, B_z . По результатам расчетов были получены оптимальные параметры системы компенсации магнитного поля, которые представлены в таблице 1.

16 пар катушек генерируют магнитное поле с почти такой же интенсивностью, что и геомагнитное поле, но противоположного направления. С этими катушками геомагнитное поле вдоль центральной оси может быть хорошо экранировано. Однако все еще есть некоторое остаточное магнитное поле в позициях, удаленных от оси, и компоненты x , y и z остаточного магнитного поля изменяются в зависимости от позиции. Тем не менее, интенсивность остаточного магнитного поля минимальна (Рис. 1.6).

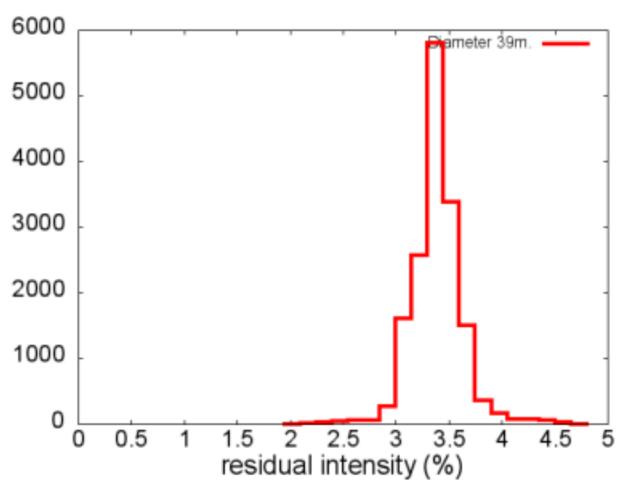
Для контроля за качеством сцинтиллятора применяется онлайн-система исследования внутренней радиоактивности сцинтиллятора (OSIRIS) [53]. Детектор способен измерять уровень содержания продуктов распада цепочек урана и тория с чувствительностью до 10^{-16} г/г. Время измерения для одной порции



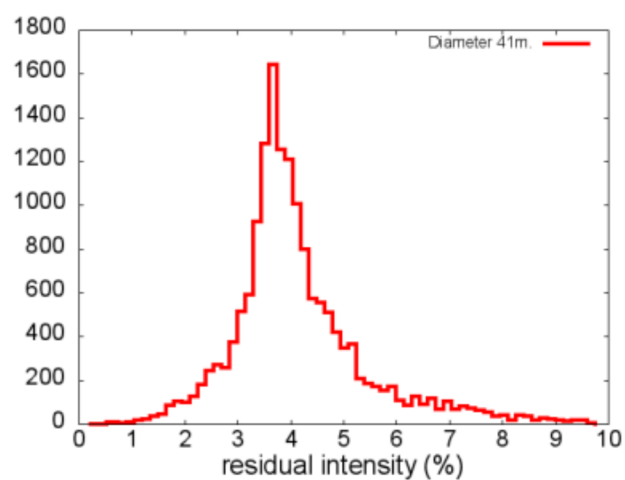
Остаточное магнитное поле для ФЭУ центральной области



Остаточное магнитное поле для ФЭУ мюонного вето



Распределение остаточного магнитного поля для ФЭУ центральной области



Распределение остаточного магнитного поля для ФЭУ мюонного вето

Рисунок 1.6 — Распределение остаточного магнитного поля для ФЭУ, расположенных в области мишени и мюонного вето [52].

№ катушки	Радиус, м	Z, м	Расстояние, м	Сила тока, А
1	3.90	± 21.30	0	26.36
2	6.57	± 20.63	0.67	52.72
3	9.25	± 19.58	1.05	52.72
4	11.12	± 18.58	1.00	65.90
5	13.28	± 17.10	1.48	79.08
6	14.99	± 15.62	1.48	79.08
7	14.99	± 15.62	1.48	79.08
8	14.99	± 15.62	1.48	79.08
9	14.99	± 15.62	1.48	79.08
10	14.99	± 15.62	1.48	79.08
11	14.99	± 15.62	1.48	79.08
12	14.99	± 15.62	1.48	79.08
13	14.99	± 15.62	1.48	79.08
14	14.99	± 15.62	1.48	79.08
15	14.99	± 15.62	1.48	79.08
16	14.99	± 15.62	1.48	79.08

Таблица 1 — Параметры системы компенсации магнитного поля в эксперименте JUNO

жидкого сцинтиллятора от нескольких дней до нескольких недель в зависимости необходимой чувствительности. Жидкий сцинтиллятор в эксперименте перед заливкой в основной детектор проходит 5 ступеней очистки. Первым шагом производится фильтрация через оксид алюминия для улучшения оптических свойств и увеличения длины затухания [54]. Далее ЛАБ проходит через систему вакуумной дистилляции для улучшения оптических свойств, а также для удаления ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K [55]. Промывка кислотой мастер-раствора с высокой концентрацией PPO и bis-MSB в ЛАБ, а затем разбавление до необходимой концентрации, является 3 шагом в процессе очистки жидкого сцинтиллятора. Водная экстракция эффективна при удалении полярных загрязнений и ионов, которые могут содержать изотопы урана, тория и калия [56]. Наконец, на последнем этапе происходит продувка азотом жидкого сцинтиллятора для удаления газов, таких как ^{222}Rn , ^{39}Ar , ^{85}Kr .

1.8 Hyper-Kamiokande

Hyper-Kamiokande – это подземный черенковский детектор следующего поколения, основанный на весьма успешном эксперименте Super-Kamiokande [57; 58]. Детектор Hyper-K будет располагаться в шахте Точибора, недалеко от города Камиока в префектуре Гифу. Детектор располагается под горой Нидзюго-яма на глубине 1750 м.в.э. Размер водного резервуара составляет 74 м в диаметре и 60 м в высоту. Таким образом, общая масса воды в двух резервуарах составляет 516 кт. Каждый из двух резервуаров состоит из двух зон, которые оптически разделены непроницаемой пленкой толщиной 60 см. Зона внутреннего детектора имеет цилиндрическую форму диаметром 70.8 м и высотой 54.8 м, этот основной эффективный объем просматривается 40 тысячами 20-дюймовых фотоэлектронных умножителей. Покрытие внутреннего детектора составляет 40%, что эквивалентно покрытию Super-K. Общий эффективный объем внутреннего детектора составляет 374 кт, что примерно в 17 раз превышает объем в SK [58]. Внешняя зона детектора просматривается 6700 8-дюймовыми фотоумножителями и служит в качестве мюонного вето.

Остаточное магнитное поле в месте расположения каждого ФЭУ внутреннего детектора рассчитывается для цилиндра диаметром 74 м и высотой 60 м. Катушки Гельмгольца расположены вдоль внутренней стенки резервуара. Значения геомагнитного поля в месте расположения детектора составляют: $B_x = -303\text{мГс}$, $B_y = 0\text{мГс}$, $B_z = -366\text{мГс}$ [58]. Для компенсации горизонтальной компоненты магнитного поля предполагаются вертикальные прямоугольные катушки вдоль оси X, для вертикальной компоненты – горизонтальные круглые катушки вдоль оси Z. Для простоты конструкции расстояние между катушками составляет 2 м как для вертикальных, так и для горизонтальных катушек.

Таким образом, для большего количества ФЭУ остаточное магнитное поле находится в пределах от 20 до 60 мГс. Среднее значение остаточного поля перпендикулярной компоненты составляет $B_{\text{perp}} = 42 \pm 26$ мГс, при этом доля фотоумножителей, на которые действуют поля выше 100 мГс, составляет 4.05% [59]. Общий вид системы компенсации магнитного поля Земли показан на рисунке 1.7.

Для вертикальных колец сила тока составляет 60 А, для горизонтальных – 67 А. Количество витков в катушках – 7. Такие параметры системы компен-

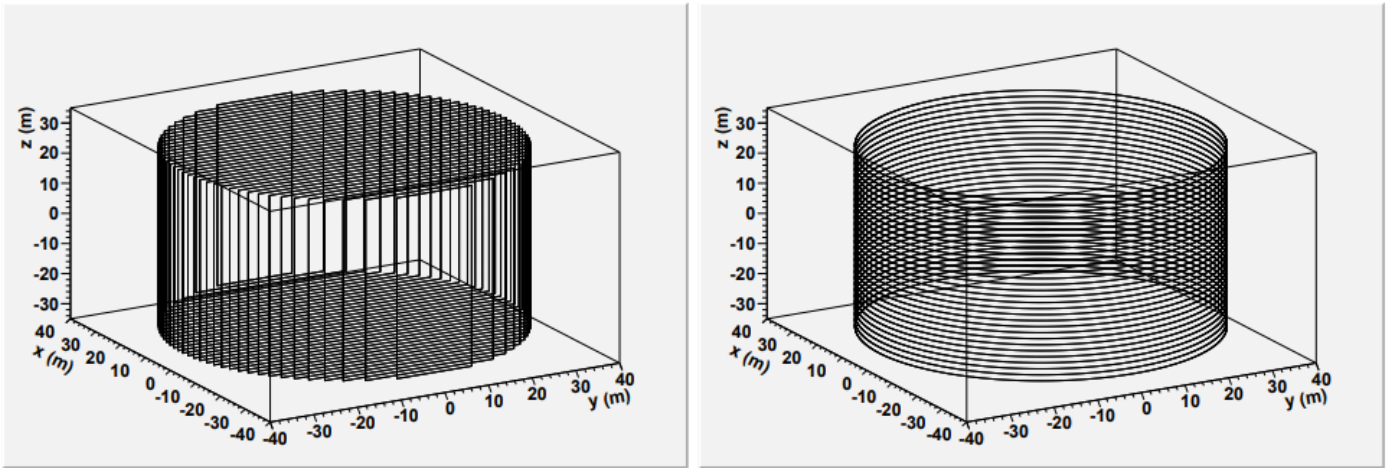


Рисунок 1.7 — Конфигурация колец Гельмгольца для детектора Hyper-Kamiokande [58].

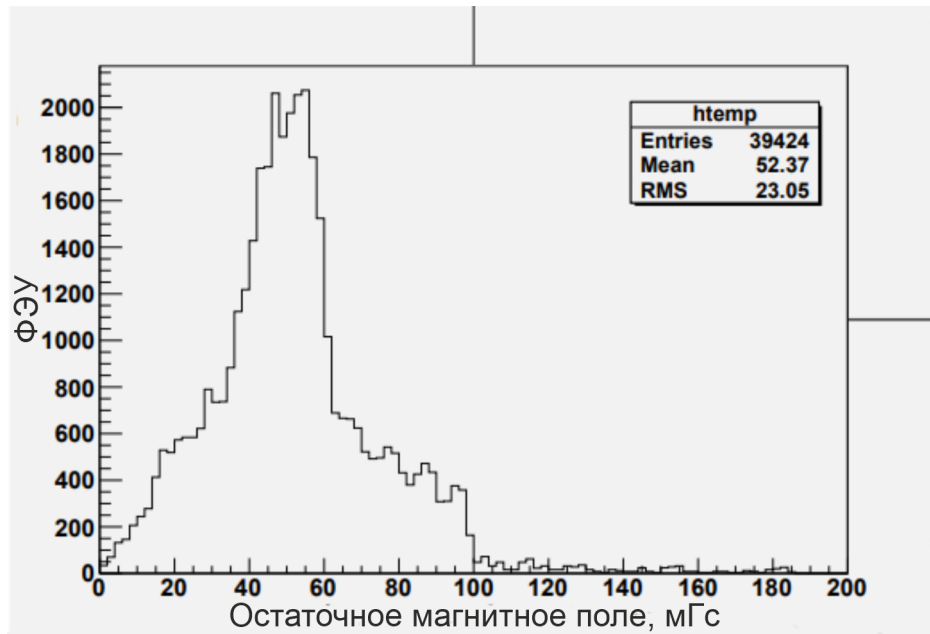


Рисунок 1.8 — Распределение остаточного магнитного поля для каждого ФЭУ внутреннего детектора [58].

сация магнитного поля являются оптимальными и обеспечивают минимальное остаточное поле для большинства ФЭУ. На рисунке 1.8 показано распределение B_{perp} для всех ФЭУ внутреннего детектора.

Глава 2. Методы компенсации и экранирования магнитного поля

2.1 Измерение магнитного поля

Основными характеристиками магнитного поля Земли являются полный вектор напряженности, его составляющие по осям координат, а также угол между горизонтальной плоскостью и полным вектором (магнитное наклонение, I) и угол между магнитным и географическим севером (магнитное склонение, D) (Рис. 2.1) [60]. Естественное магнитное поле Земли обусловлено внутренним строением и процессами, происходящими внутри нашей планеты. Величина внешнего магнитного поля, помимо магнитного поля Земли, зависит от геологических условий территории и объектов, непосредственно находящихся в месте измерения поля. Для каждой точки Земли известно математически рассчитанное магнитное поле (IGRF) [51; 61]. Модель создается и поддерживается международной группой ученых под эгидой международной ассоциации геомагнетизма и аэронавтики. IGRF содержит данные, полученные с помощью спутников, наземных обсерваторий и магнитных съемок. Основное назначение аналитического поля – изучение магнитного поля ядра Земли, электромагнитной индукции и локальных аномалий в литосфере. Поле ядра Земли меняется непрерывно и непредсказуемо в масштабах времени от месяцев до миллионов лет. Для учета временных изменений в масштабах времени в несколько лет IGRF регулярно пересматривается, как правило, каждые 5 лет. На данный момент последней версией является 14-ая итерация модели (IGRF-14).

Однако, данная модель не учитывает локальные магнитные поля, создаваемые источниками непосредственно в месте исследований. При проведении прецизионных измерений необходимо точно знать величину магнитного поля. Для измерения индукции магнитного поля был создан модуль на основе микропроцессора Arduino и трехосевого магнитометра HMC5883L (Рис.2.2) [62]. Схемотехника модуля показана на рисунке 2.3. В основе данного магнитометра лежат три магниторезистивных датчика, которые изготовлены из тонких пленок из пермаллоя. При наличии магнитного поля изменение происходит изменение сопротивления элементов, что вызывает соответствующее изменение напряжения на выходах моста. Резистивные элементы каждого датчика имеют

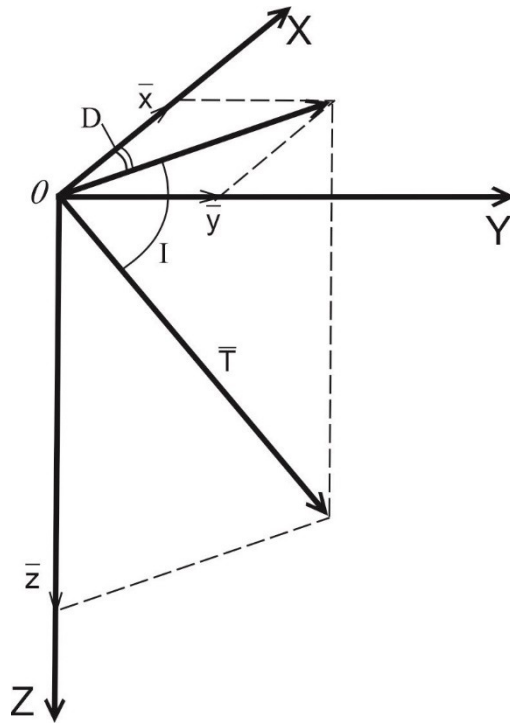


Рисунок 2.1 — Основные элементы геомагнитного поля.

общую чувствительную ось, которая обеспечивает положительное изменение напряжения в присутствии магнитных полей, увеличивающихся в чувствительном направлении. Поскольку выход пропорционален только компоненте магнитного поля вдоль датчика оси, дополнительные мосты датчиков размещаются в ортогональных направлениях, чтобы обеспечить точное измерение магнитного поля в любой ориентации. Разработанный модуль способен проводить измерения магнитной индукции величиной до $B = 8$ Гс, чувствительность магнитометра составляет 5 мГс, что является избыточным для проводимых измерений магнитной индукции.

На практике измеренные значения магнитного поля включают в себя магнитные поля соседних источников, которые вносят свой вклад в показания магнитометра. Основными источниками помех являются hard-iron и soft-iron искажения, которые получили свое название от магнитотвердых и магнитомягких ферромагнетиков. Магнитотвердые источники представляют собой магниты или другие источники постоянного магнитного поля, которые вращаются вместе с магнитометром и вносят постоянный вклад в его показания. Магнитомягкие ферромагнетики намагничиваются в магнитном поле Земли и становятся источниками магнитного поля, которое изменяется в зависимости от положения ферромагнетика в пространстве [63]. Например, металлические

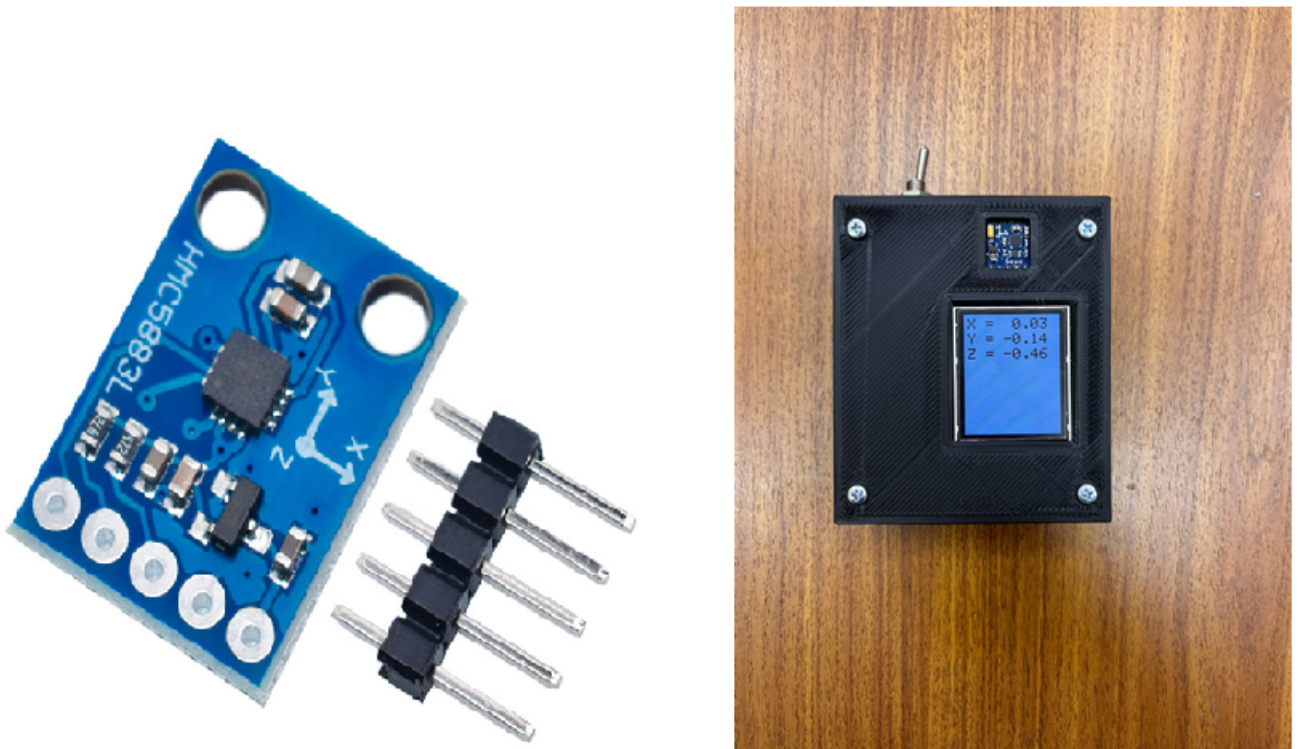


Рисунок 2.2 — Модуль HMC5883L и магнитометр на его основе.

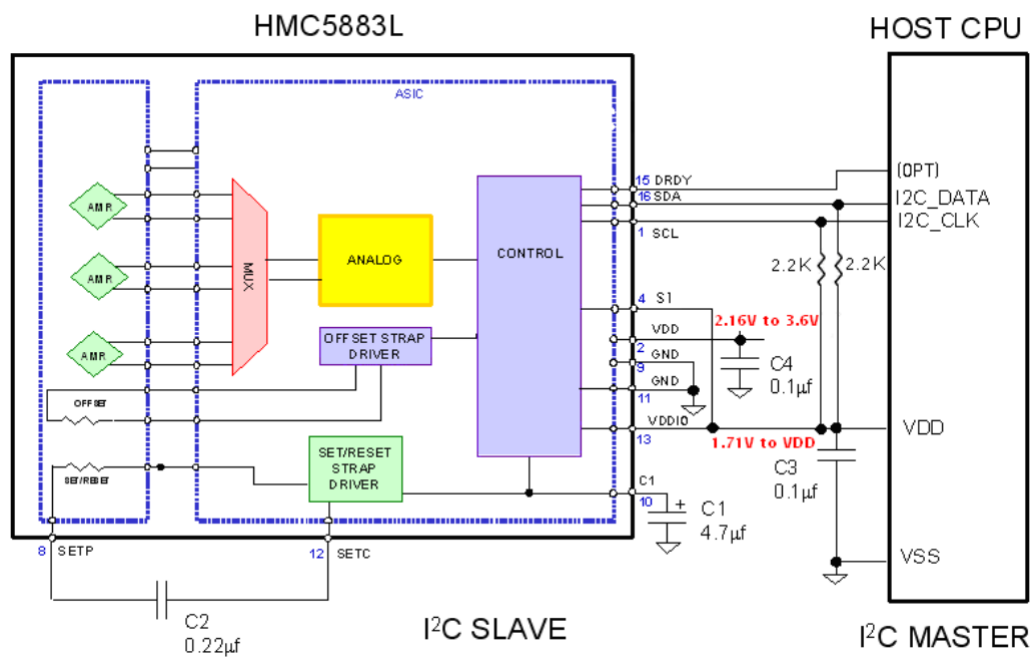


Рисунок 2.3 — Схемотехника модуля HMC5883L [62].

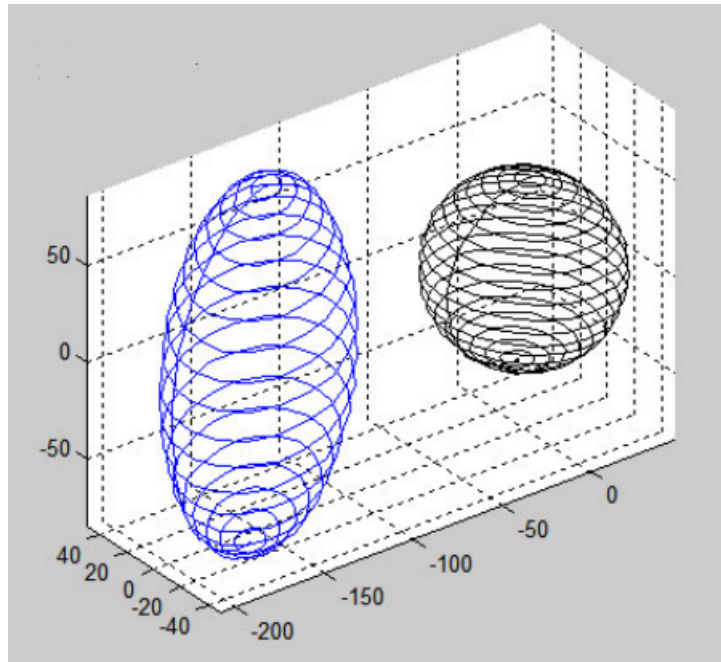


Рисунок 2.4 — Искажения магнитного поля [63].

элементы, располагающиеся рядом с магнитометром. Они вносят свой вклад в изменение направления вектора магнитной индукции.

Если вращать магнитометр на 360° и отобразить его показания в трехмерном виде, то при отсутствии искажений показания примут вид сферы с центром в начале координат. При наличии soft-iron искажений сфера примет форму эллипса, при наличии hard-iron искажений сфера будет смещена от начала координат (Рис. 2.4).

Существует несколько способов калибровки трехосевых магнитометров, которые описаны в работах [64–69]. Далее описывается метод, который применялся для калибровки магнитометра, рассмотренного выше. Так как остаточное магнитное поле после компенсации должно быть минимальным, необходимо точно знать начальные значения магнитного поля в требуемом пространстве. Таким образом, необходимо учесть все искажения, которые влияют на показания магнитометра, и провести его калибровку. Уравнение для вычисления откалиброванных значений магнитной индукции выглядит следующим образом:

$$\vec{B}_{calib} = S \times (\vec{B}_{meas} - \vec{H}),$$

где $\vec{B}_{calib}$ – значения магнитного поля после калибровки; S – коэффициенты, ответственные за soft-iron искажения; $\vec{B}_{meas}$ – значения магнитного поля до калибровки; $\vec{H}$ – коэффициенты, ответственные за hard-iron искажения.

Для проведения калибровки необходимо получить набор неоткалиброванных значений при разных положениях магнитометра, для этого магнитометр вращается в произвольных направлениях вокруг своей оси в течение нескольких минут. При повышении количества неоткалиброванных значений точность калибровочных коэффициентов повышается. Количество полученных значений составило 1300. Затем необходимо вычислить калибровочные коэффициенты для каждой оси. Искажения от магнитотвердых ферромагнетиков вносят некоторое постоянное смещение измеряемым значениям. Поправки для этих искажений вычисляются по формуле:

$$\vec{H}_A = \frac{A_{min} - A_{max}}{2} - A_{min},$$

где A_{min} и A_{max} – минимальное и максимальное значение магнитного поля для каждой оси. Коэффициенты для устранения влияния soft-iron искажений вычисляются по формуле:

$$\vec{S}_A = \frac{B_{max} - B_{min}}{A_{max} - A_{min}},$$

где B_{max} и B_{min} – максимальное и минимальное значение магнитного поля для той оси, где разница между этими значениями наибольшая; A_{max} и A_{min} – максимальное и минимальное значение магнитного поля для оси A.

2.2 Катушки Гельмгольца

Активный метод компенсации магнитного поля основан на применении специальных катушек Гельмгольца, которые создают дополнительное магнитное поле, направленное в противоположную сторону по отношению к внешнему полю. В результате их взаимодействия происходит взаимная компенсация, и суммарное магнитное поле становится равным нулю ($B = 0$). К основным преимуществам этого подхода относится высокая эффективность компенсации сильных магнитных полей в больших объемах пространства, низкая стоимость реализации и простота установки. Кроме того, данный метод обеспечивает более точное управление компенсационным полем с учётом изменений внешних условий. Магнитное поле, создаваемое электрическим током, можно вычислить как

векторную сумму полей, создаваемых каждым элементарным участком тока. Согласно закону Био-Савара-Лапласа, элемент тока длины dl создает магнитное поле с индукцией:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; I – сила тока, А; $d\vec{l}$ – элемент тока, для которого рассчитывается магнитная индукция, м; $\vec{r}$ – радиус вектор в точку наблюдения, м.

Набор катушек Гельмгольца представляет собой две соосные круглые катушки, имеющие одинаковый диаметр и равное число витков. Катушки расположены параллельно друг другу вдоль общей оси, проходящей через их центры, при этом расстояние между катушками соответствует их радиусу [70]. В случае многovitковых катушек диаметр проводника обмотки значительно меньше диаметра самих катушек.

Катушки соединены последовательно для получения равной силы тока в каждом проводнике, что обеспечивает формирование почти однородного магнитного поля в области, расположенной вблизи центра между ними. Величина магнитной индукции в центре между катушками определяется по формуле [71]:

$$B = \frac{4^{\frac{3}{2}}}{5} \frac{\mu_0 n I}{R},$$

где n – количество витков в катушках; I – сила тока, А; R – радиус катушек и расстояние между ними, м. Создаваемая магнитная индукция зависит от количества витков в катушках и силы тока в них. Сила тока является ограничивающим параметром вследствие нагрева проводника, поэтому самым распространенным методом увеличения магнитной индукции является увеличение количества витков в системе.

Помимо стандартной конфигурации для улучшения однородности магнитного поля применяются различные конфигурации катушек такие как, катушки Бэкера, Максвелла, МакКихана и другие. В работах [72–79] приводятся расчеты магнитного поля для различных конфигураций.

2.3 Исследование влияния магнитного поля на параметры фотоэлектронных умножителей

При прохождении фотоэлектронов от фотокатода до динодной системы фотоумножителя, а также при движении вторичных электронов в динодной системе, магнитное поле оказывает влияние на их траектории. Сила Лоренца, воздействующая на электроны, описывается формулой:

$$F = q \times B \times v \times \sin \alpha,$$

где q – заряд электрона, Кл; B – магнитная индукция, Тл; v – скорость движения электрона, м/с; α – угол между направлением движения и магнитной индукцией. Под влиянием силы Лоренца электроны движутся по спиральным траекториям и могут не доходить до первого динода или доходить за большее время. Таким образом, при наличии магнитного поля такие параметры фотоумножителей, как коэффициент усиления, эффективность регистрации фотонов, временные параметры, могут ухудшаться, тем самым нарушая работу всего детектора. Энергетический спектр нейтрино измеряется путем подсчета числа фотоэлектронов при каждом взаимодействии нейтрино, коэффициент усиления ФЭУ должен быть достаточно высок, чтобы выделять единичные фотоэлектроны. Фотоумножители также должны быть способны отличать сигналы отдельных фотоэлектронов от шума, для чего необходимо, чтобы пик пик одного фотоэлектрона был как можно более узким и имел большое отношение Пик/Долина.

Исследования влияния магнитного поля на параметры фотоэлектронных умножителей проводились во многих работах [80–82]. Исследование влияния магнитного поля проводилось на фотоэлектронных умножителях Hamamatsu R7081-100 WA-S70, используемых в прототипе с массой мишени 5 т [83]. Измерения выполнялись в два этапа. На первом этапе изучалась зависимость коэффициента усиления ФЭУ от естественного магнитного поля Земли. Фотоумножитель располагался горизонтально на поворотной платформе, при этом уровень засветки фотокатода устанавливался таким образом, чтобы основная доля зарегистрированных событий приходилась на однофотоэлектронные импульсы. Этот режим достигался при среднем значении пуассоновского $\lambda = 0.1$, что обеспечивало около 95% однофотоэлектронных событий. Расстояние между

Положение ФЭУ, вид сверху

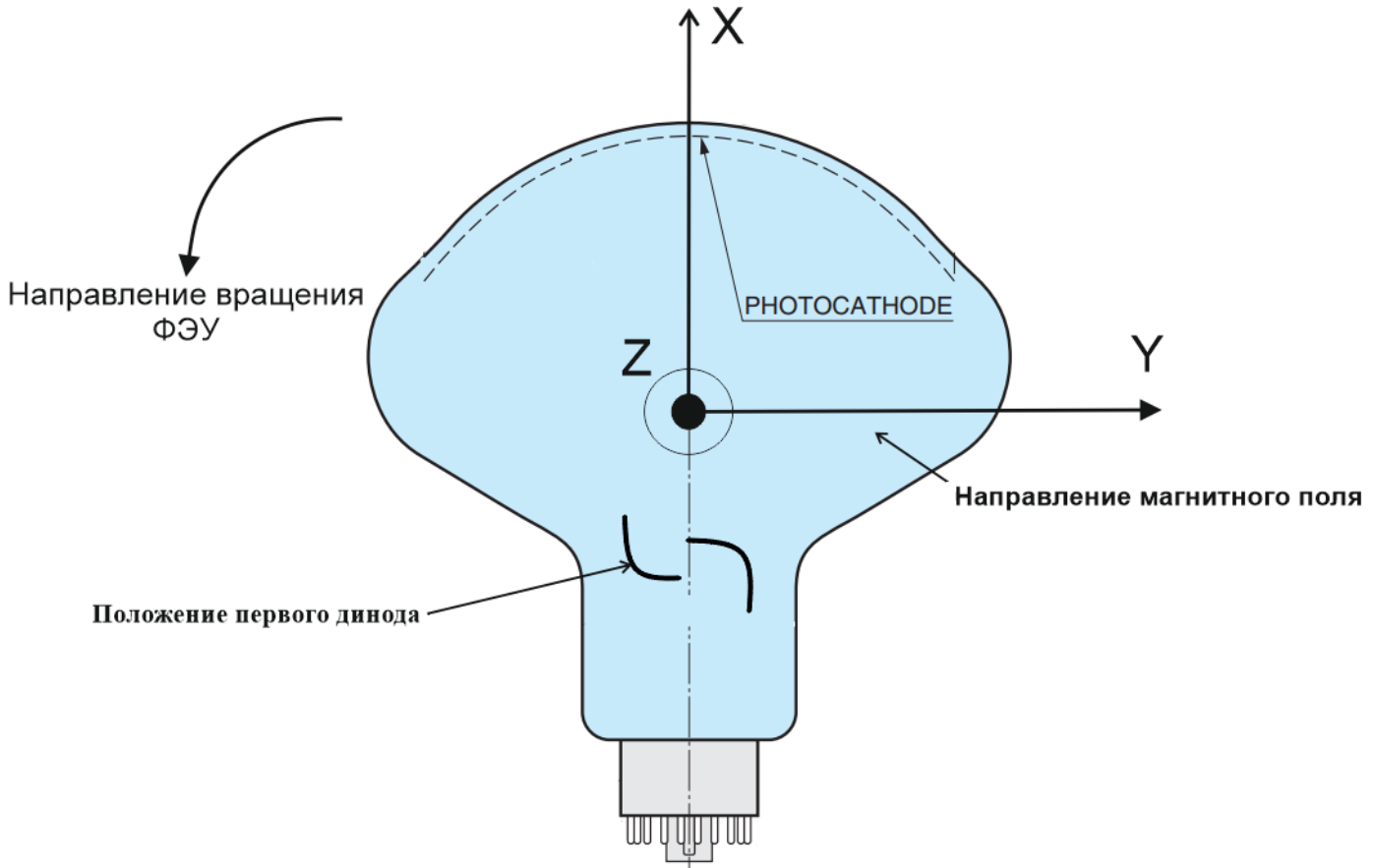


Рисунок 2.5 — Положение фотоумножителя относительно направления магнитного поля Земли, направление вращения ФЭУ в процессе измерений.

выходом оптоволоконного кабеля и фотокатодом составляло 70 см. Платформа вращалась вокруг своей оси против часовой стрелки с шагом 30° . Фотоумножитель размещался таким образом, чтобы поверхность первого динода была ориентирована параллельно вертикальной составляющей магнитного поля B_Z .

На рисунке 2.5 приведено начальное положение ФЭУ относительно направления вектора магнитного поля Земли, а также указано направление вращения платформы в процессе измерений. В начальной точке положения фотоумножителя величины компонент магнитного поля составляли: $B_X=0.08$ Гс, $B_Y=-0.22$ Гс, $B_Z=0.43$ Гс. По результатам измерений были рассчитаны коэффициенты усиления ФЭУ при разных его положениях в магнитном поле Земли. Значение коэффициента усиления, равное единице на графиках, соответствует коэффициенту усиления $G = 1.1 \times 10^7$. Разброс коэффициента усиления ФЭУ в процессе измерений составил около 7% (Рис. 2.6).

На втором этапе изучалась зависимость коэффициента усиления и времени пролёта фотоэлектронов от величины магнитного поля. Для этого был

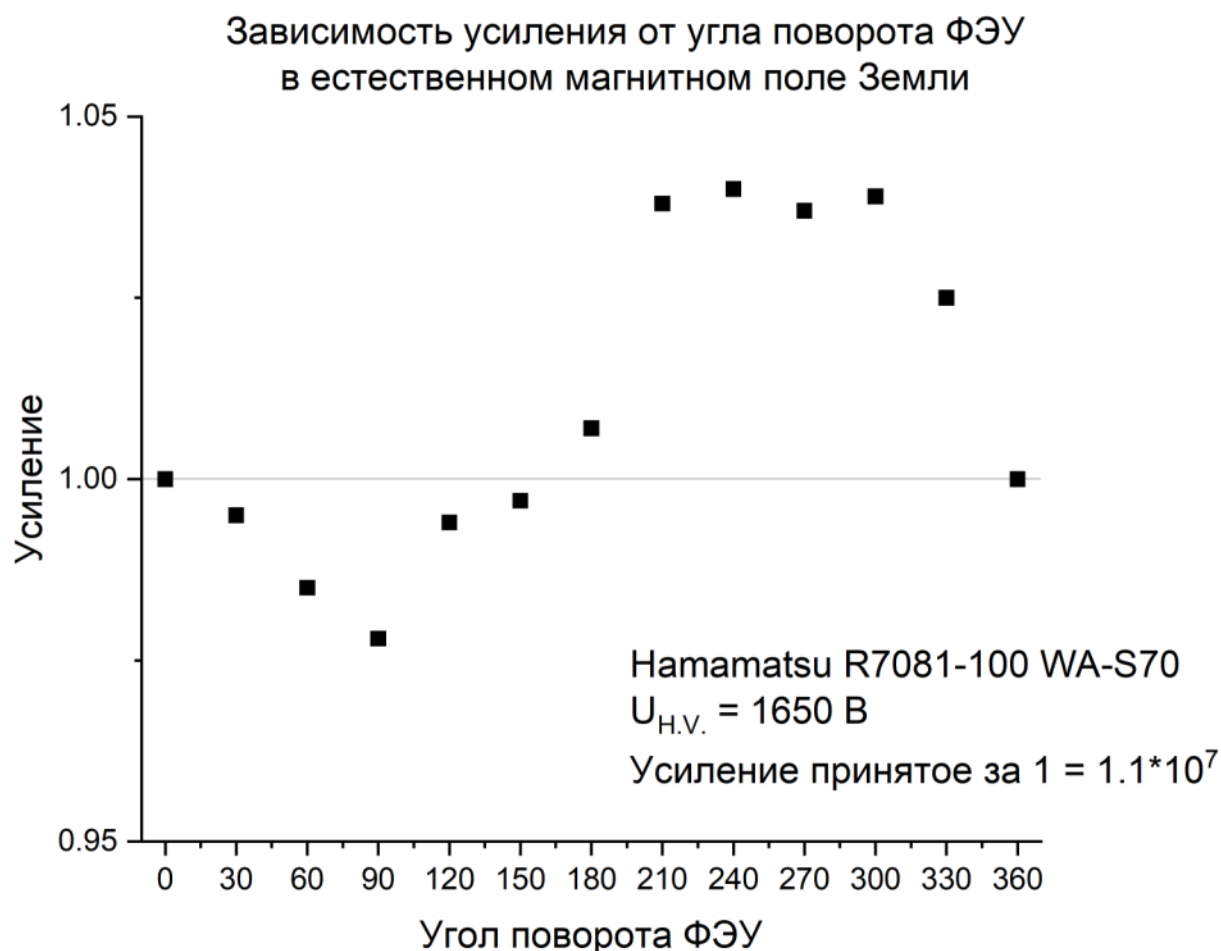


Рисунок 2.6 — Зависимость коэффициента усиления фотоумножителя от расположения в магнитном поле Земли.

собран измерительный стенд с использованием катушек Гельмгольца квадратной формы. Размеры и параметры катушек подбирались таким образом, чтобы обеспечить создание однородного магнитного поля в требуемом объёме, что было подтверждено построением карт распределения магнитной индукции. Согласно расчётам, максимальная однородность поля достигается при расстоянии между катушками $L=0.54A$, где A - длина стороны катушки. Для расчета создаваемого катушками квадратной формы магнитного поля используется формула:

$$B = 1.01796 \frac{2\mu_0 n I}{\pi A},$$

где A – половина длины стороны катушки, м. Были изготовлены три пары катушек Гельмгольца для компенсации трёх компонент магнитного поля (Рис. 2.7). В качестве проводника использовался одножильный кабель марки ВВГ производства компании TDM Electric. Кабель состоит из медной жилы, заключённой в оболочку из поливинилхлорида (ПВХ) с пониженным дымо-

Магнитная индукция, создаваемая катушками Гельмгольца

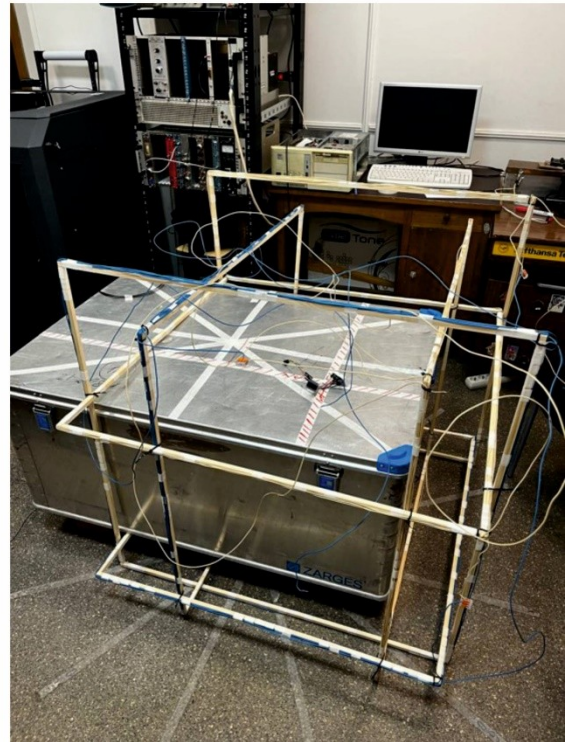
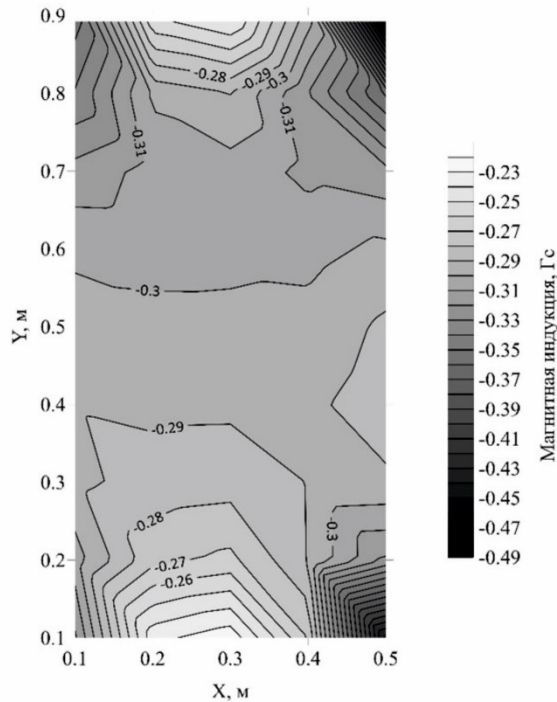


Рисунок 2.7 — Измерительный стенд с катушками Гельмгольца и магнитная индукция, создаваемая катушками.

и газовыделением, а также низкой токсичностью продуктов горения. Сечение кабеля составляет $1,5 \text{ мм}^2$. Сопротивление катушек, предназначенных для компенсации горизонтальных компонент магнитного поля, составляет $0,44 \text{ Ом}$, а для вертикальной компоненты - $0,55 \text{ Ом}$. Для компенсации вертикальной компоненты магнитного поля ток в проводнике составляет $4,4 \text{ А}$ при напряжении $2,42 \text{ В}$. Для создания магнитной индукции величиной $0,5 \text{ Гс}$ сила тока увеличивается до $9,3 \text{ А}$ при напряжении $5,28 \text{ В}$. Длина стороны катушек варьируется от 92 до 100 см для того, чтобы была возможность попарно вложить друг в друга. Согласно нормативам Правил устройства электроустановок (ПУЭ) [84], допустимая токовая нагрузка для медного проводника сечением $1,5 \text{ мм}^2$ составляет 15 А . Таким образом, эксплуатация катушек Гельмгольца в описанной конфигурации является безопасной и соответствует требованиям нормативной документации.

Для создания горизонтальных компонент магнитной индукции использовались катушки с числом витков $N=5$, для вертикальной компоненты – $N=6$. Область однородного поля имела размеры $54 \times 54 \times 54 \text{ см}^3$. Каждая пара катушек подключалась к отдельному источнику тока, что обеспечивало независимую регулировку поля для каждой оси.

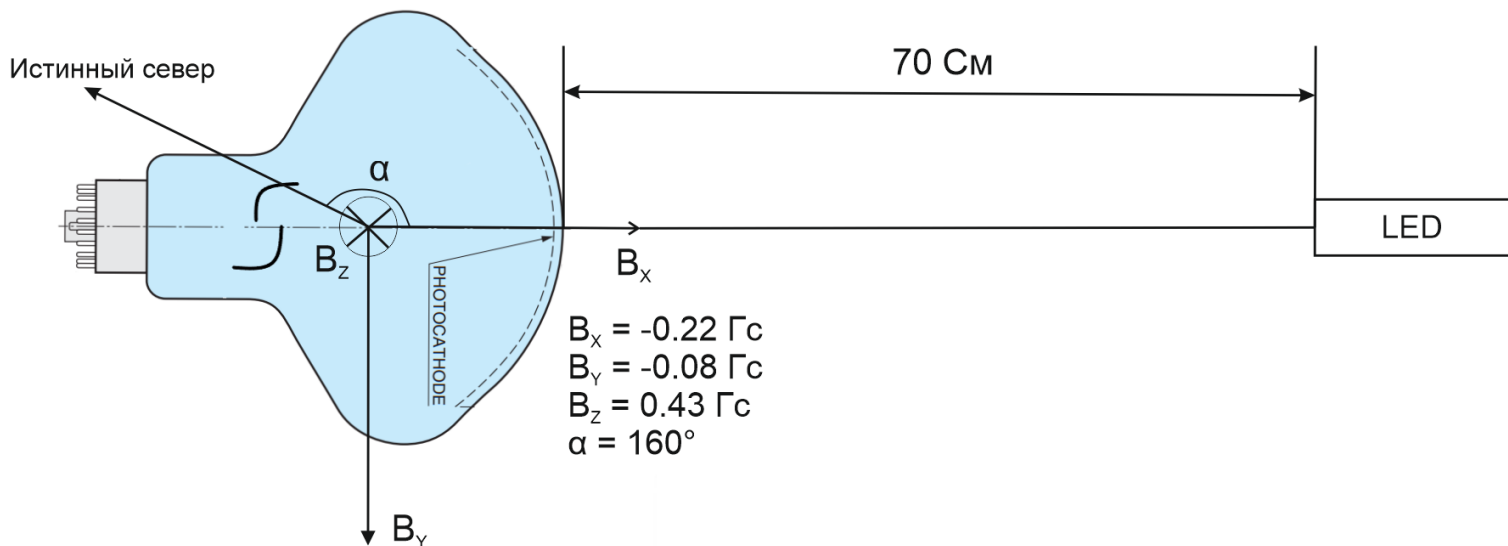


Рисунок 2.8 — Расположение фотоумножителя в искусственно создаваемом магнитном поле.

В процессе измерений ФЭУ фиксировался в положении, перпендикулярном всем трём осям магнитной индукции (Рис. 2.8). Каждая из компонент магнитного поля изменялась последовательно в диапазоне от -0.5 до 0.5 Гс с шагом 0.1 Гс, при этом две оставшиеся компоненты компенсировались. На основании полученных данных были построены зависимости коэффициента усиления ФЭУ и отношения пик/долина (P/V) от величины магнитной индукции каждой компоненты (Рис. 2.9 — 2.11). Отношение пик/долина определялось как отношение числа событий в максимуме спектра однофотоэлектронных импульсов к числу событий в минимуме между пьедесталом и пиком.

Результаты показали, что для горизонтальной компоненты B_y изменение коэффициента усиления достигает примерно 20%, а значение отношения пик/долина уменьшается примерно в два раза при поле $B_y = 0.5$ Гс. Наименее чувствительной оказалась ось B_x , направленная вдоль траектории полёта фотоэлектронов: изменение коэффициента усиления составляло около 5%, а значение P/V уменьшалось примерно в 1.3 раза. Наиболее чувствительной оказалась ось, ориентированная вдоль поверхности первого динода, соответствующая вертикальной компоненте магнитного поля. При изменении этой компоненты коэффициент усиления изменялся примерно на 22%, а отношение пик/долина снижалось почти в четыре раза.

Дополнительно проводилось исследование влияния магнитного поля на время пролёта фотоэлектронов. Методика измерений была аналогична описан-

Зависимость коэффициента усиления и отношения Пик/Долина при однофотонной засветке фотокатода от изменения магнитного поля вдоль компоненты X

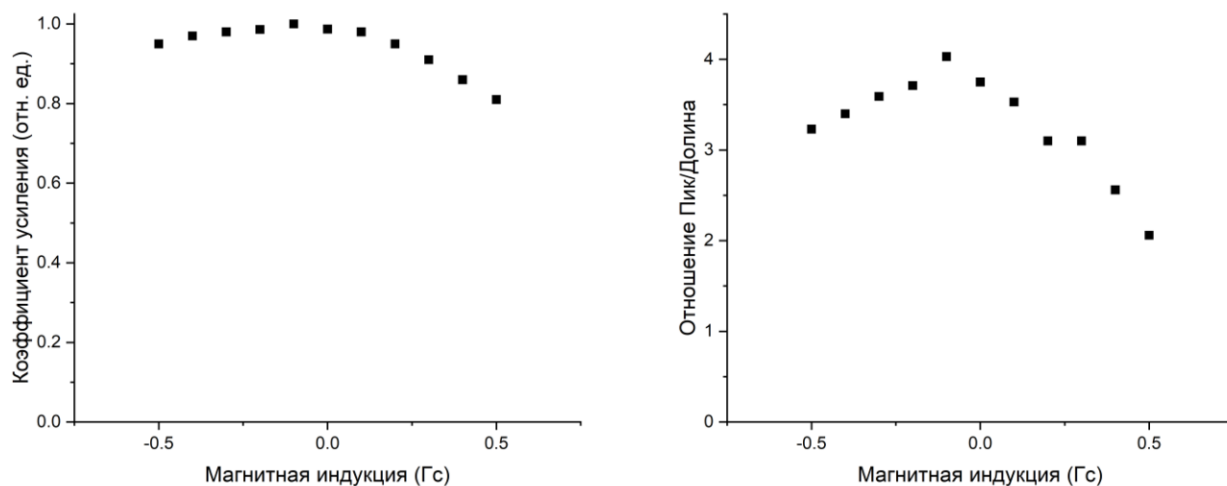


Рисунок 2.9 — Зависимость коэффициента усиления ФЭУ и отношения Пик/-Долина от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.

Зависимость коэффициента усиления и отношения Пик/Долина при однофотонной засветке фотокатода от изменения магнитного поля вдоль компоненты Y

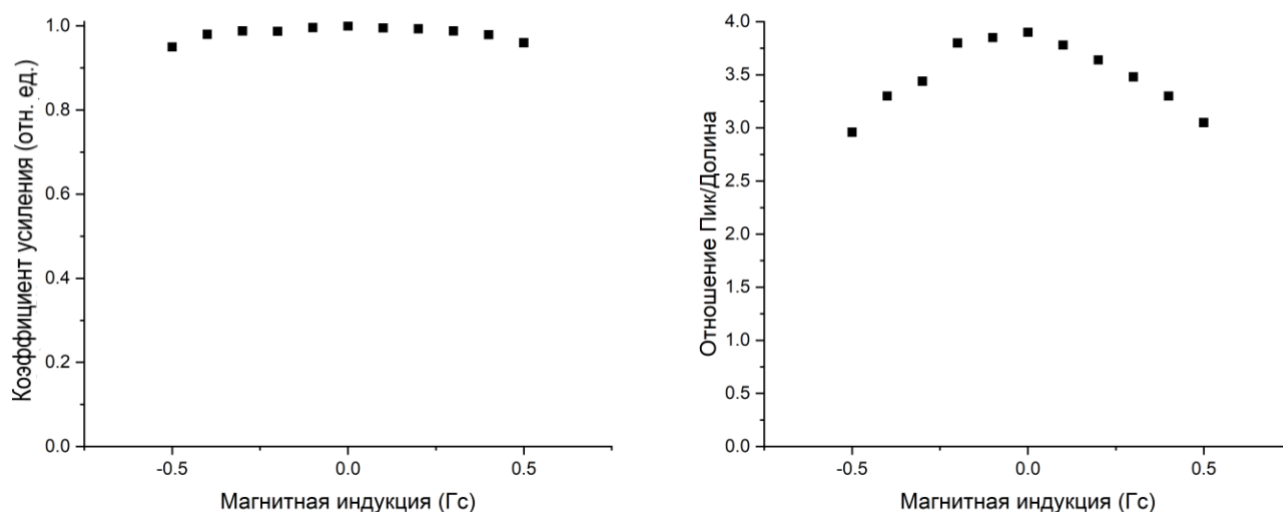


Рисунок 2.10 — Зависимость коэффициента усиления ФЭУ и отношения Пик/-Долина от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.

Зависимость коэффициента усиления и отношения Пик/Долина при однофотоэлектронной засветке фотокатода от изменения магнитного поля вдоль компоненты Z

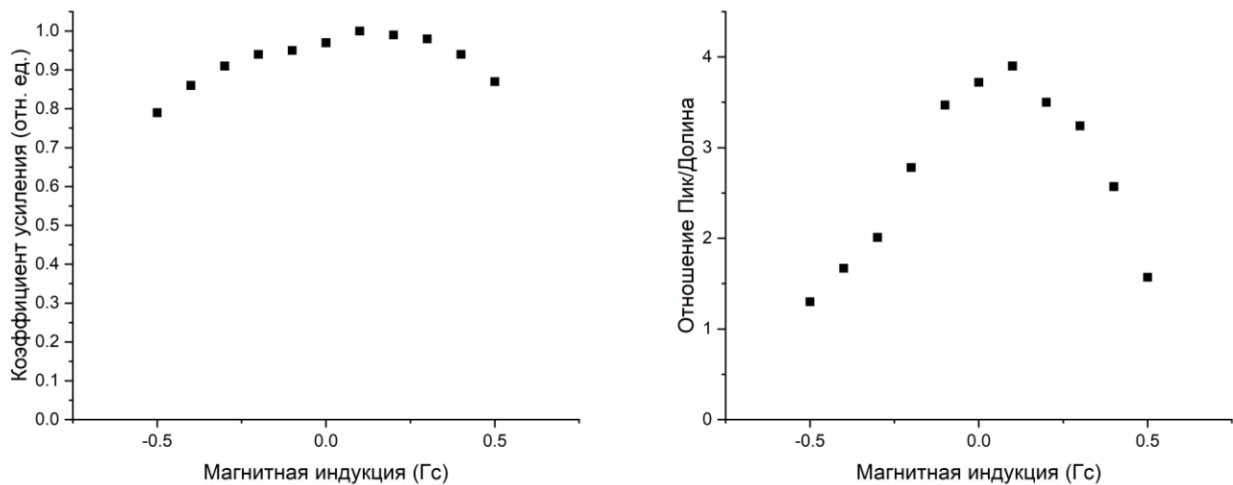


Рисунок 2.11 — Зависимость коэффициента усиления ФЭУ и отношения Пик/-Долина от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.

ной выше: одна из компонент магнитного поля изменялась в диапазоне от -0.5 до 0.5 Гс, в то время как две другие компенсировались. Уровень засветки фотокатода также поддерживался на уровне, соответствующем преобладанию однофотоэлектронных событий. Наименее чувствительной к изменению магнитного поля оказалась продольная ось B_X : ширина распределения времени пролёта на полувысоте варьировалась от 2.2 до 2.5 нс (Рис. 2.12). При изменении горизонтальной компоненты B_Y ширина на полувысоте изменялась в диапазоне 2-5 нс (Рис. 2.13), а при изменении вертикальной компоненты B_Z — от 2 до 2.8 нс (Рис. 2.14).

Для подтверждения корректности работы системы компенсации магнитного поля были проведены сравнения влияния естественного магнитного поля и его отдельных компонентов — X и Y. Для учета влияния вертикальной составляющей магнитного поля коэффициент усиления ФЭУ был нормирован на значение вертикальной компоненты $B_Z = 0.4$ Гс и составил $G = 1.07 \times 10^7$. При вращении фотоумножителя горизонтальная составляющая естественного магнитного поля изменялась от -0.234 до 0.234 Гс относительно поперечных осей ФЭУ, что привело к изменению коэффициента усиления на 7%. Изменение компоненты B_X в диапазоне от -0.2 до 0.2 Гс привело к изменению коэффициента усиления от 1.01×10^7 до 1.07×10^7 , что соответствует относительному изменению на 5%. Для компоненты B_Y в том же диапазоне изменение коэффициента

Зависимость распределений времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода от изменения магнитного поля вдоль компоненты X

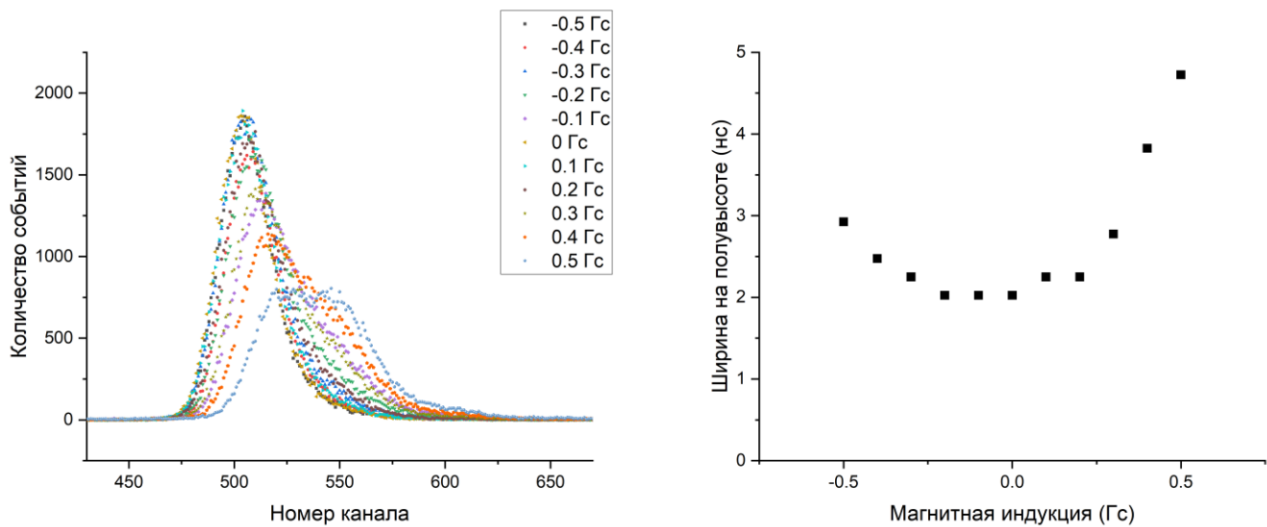


Рисунок 2.12 — Зависимость распределений времен пролета фотоэлектронов от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.

Зависимость распределений времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода от изменения магнитного поля вдоль компоненты Y

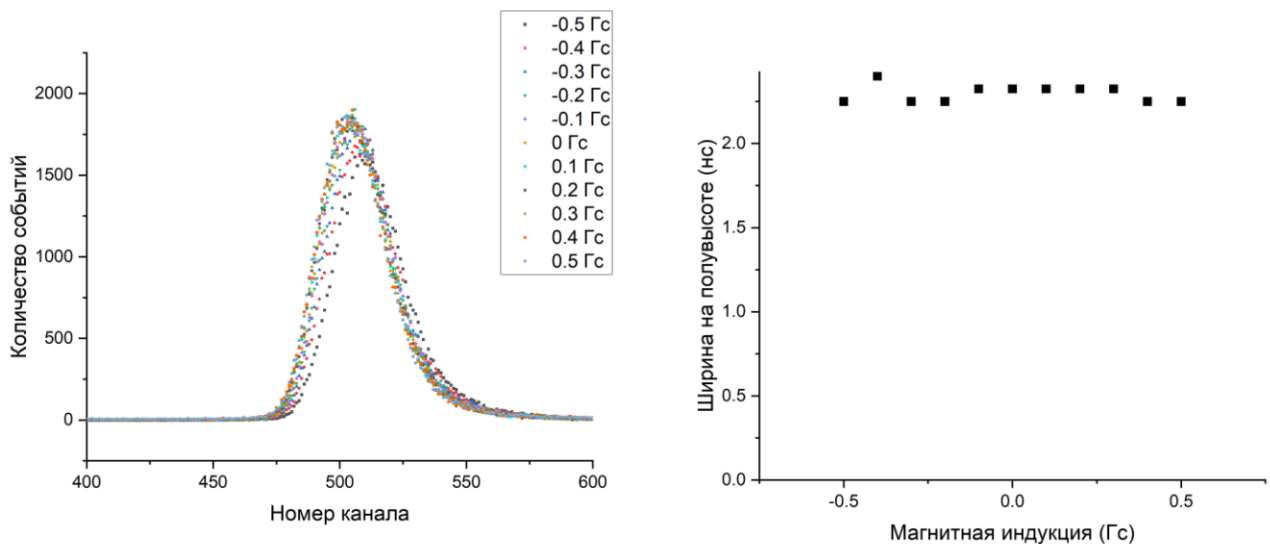


Рисунок 2.13 — Зависимость распределений времен пролета фотоэлектронов от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.

Зависимость распределений времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода от изменения магнитного поля вдоль компоненты Z

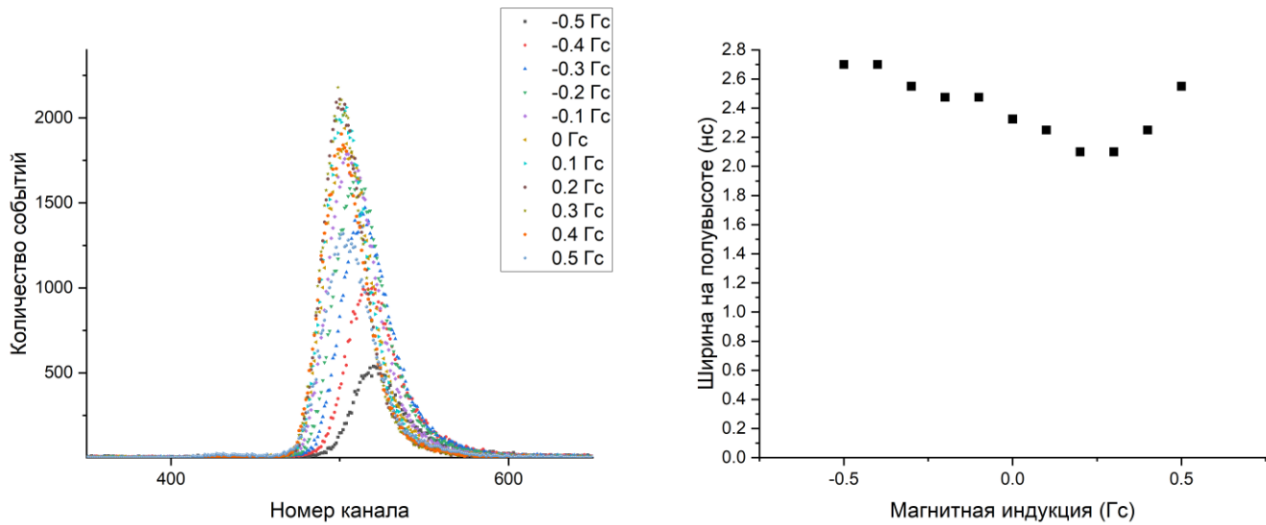


Рисунок 2.14 — Зависимость распределений времен пролета фотоэлектронов от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.

усиления составило от 1.056×10^7 до 1.07×10^7 , что соответствует изменению на 1.3%. Таким образом, наблюдаемое изменение коэффициента усиления при варьировании естественного и искусственно создаваемого магнитного поля оказывается сопоставимым, что подтверждает корректность работы системы компенсации. Также ФЭУ вращался вокруг своей оси на угол 30° при компенсированном магнитном поле. Было проведено сравнение изменения коэффициента усиления при его вращении без компенсации магнитного поля и с компенсацией, результаты показаны на рисунке 2.15. Как видно из приведенного рисунка изменение усиления при использовании системы компенсации составляет менее 1%. Единица на графике соответствует коэффициенту усиления $G = 1.11 \times 10^7$. Результаты сравнения коэффициентов усиления представлены в таблице 2

Влияние магнитного поля на параметры фотоэлектронных умножителей увеличивается для ФЭУ больших размеров, так как увеличивается пробег фотоэлектронов и вторичных электронов в объеме ФЭУ. Одним из исследований эффективности компенсации магнитного поля на фотоумножители больших размеров были измерения с ФЭУ R12860 производства Hamamatsu Photonics. Данные фотоумножители разрабатываются для водных черенковских детекторов следующего поколения таких, как Hyper-Kamiokande [58]. R12860 имеет линейно-коробчатую динодную систему с 10 линейно-фокусированными динодами, широкий первый динод коробчатого типа обеспечивает высокую эффективность детектирования фотонов в то время, как 9 ли-

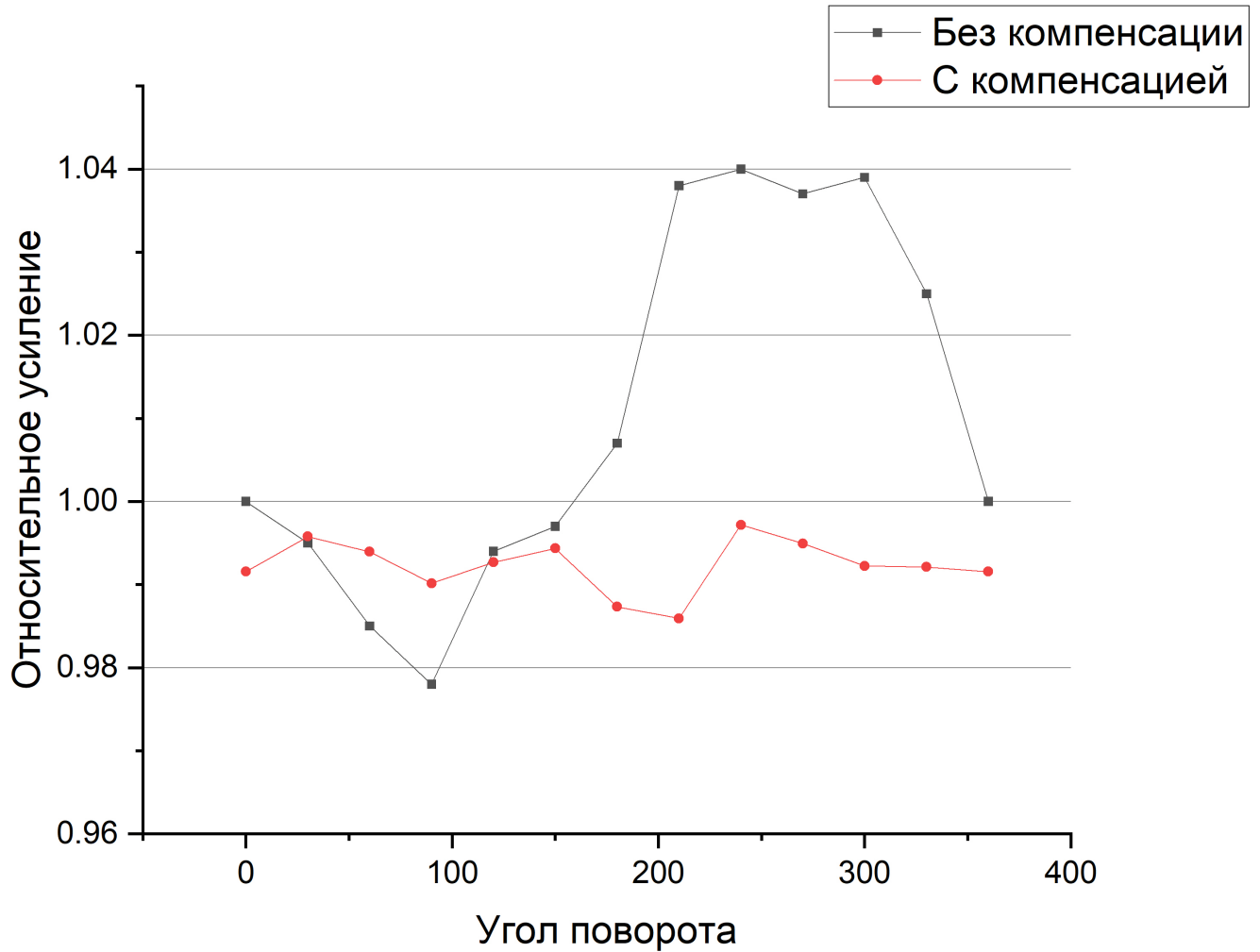


Рисунок 2.15 — Сравнение изменения коэффициента усиления фотоумножителя при его вращении без компенсации магнитного поля и с компенсацией.

нейно-фокусированных динодов обеспечивают малый разброс времени пролета электронов сквозь динодную систему. Катодная камера выполнена из боросиликатного стекла с новым типом высокоэффективного бищелочного фотокатода. Выравнивание и позиционирование динодов, а также разрядной цепи, позволили достигнуть лучшего из возможных зарядового и временного разрешений, эффективности детектирования и равномерности отклика. Схема делителя напряжения показана на рисунке 2.16.

Измерения проводились на том же стенде с использованием колец Гельмгольца. Фотоумножитель размещался в светоизолированном ящике, вокруг которого располагались кольца Гельмгольца квадратной формы. Значения магнитного поля в точке измерений составляло $B_X = 0.17$ Гс, $B_Y = 0.19$ Гс, $B_Z = 0.35$ Гс, фотоумножитель располагался горизонтально. Высокое напря-

Рисунок 2.16 — Схема делителя напряжения для ФЭУ Наматatsu R12860.

	Коэффициент усиления ФЭУ без компенсации, $G \times 10^7$	Коэффициент усиления ФЭУ с компенсацией, $G \times 10^7$
0°	1.11	1.1006
30°	1.104	1.105
60°	1.093	1.103
90°	1.085	1.099
120°	1.103	1.102
150°	1.107	1.104
180°	1.118	1.095
210°	1.152	1.094
240°	1.154	1.107
270°	1.151	1.104
300°	1.153	1.101
330°	1.138	1.101
360°	1.11	1.1006

Таблица 2 — Значения коэффициента усиления ФЭУ в зависимости от его положения в пространстве без и с использованием системы компенсации магнитного поля

жение ФЭУ устанавливалось на уровне 2000 В, шумы темнового тока при пороге 0.25 ФЭ составляли 5-7 кГц. Засветка фотокатода была на уровне одного фотоэлектрона. Исследования влияния магнитного поля на параметры ФЭУ проводились в два этапа.

На первом этапе велось исследование влияния естественного магнитного поля на параметры фотоумножителя. Первоначально ФЭУ располагался таким образом, чтобы его продольная ось была направлена в отрицательном направлении оси X естественного поля Земли. Затем ФЭУ вращался против часовой стрелки на угол 90°. В результате были построены зарядовые спектры однофотоэлектронных импульсов для четырех положений фотоумножителя в пространстве. Как видно из рисунка 2.17, для 1 из 4 положений не выделяется пик, обусловленный однофотоэлектронными импульсами, что свидетельствует о низкой эффективности детектирования фотоэлектронов. Коэффициент усиления ФЭУ изменяется от 0.73×10^7 до 1.09×10^7 .

Следующий этап исследований проводился в три шага. На каждом шаге компенсировалась дополнительная компонента магнитного поля. Первой ком-

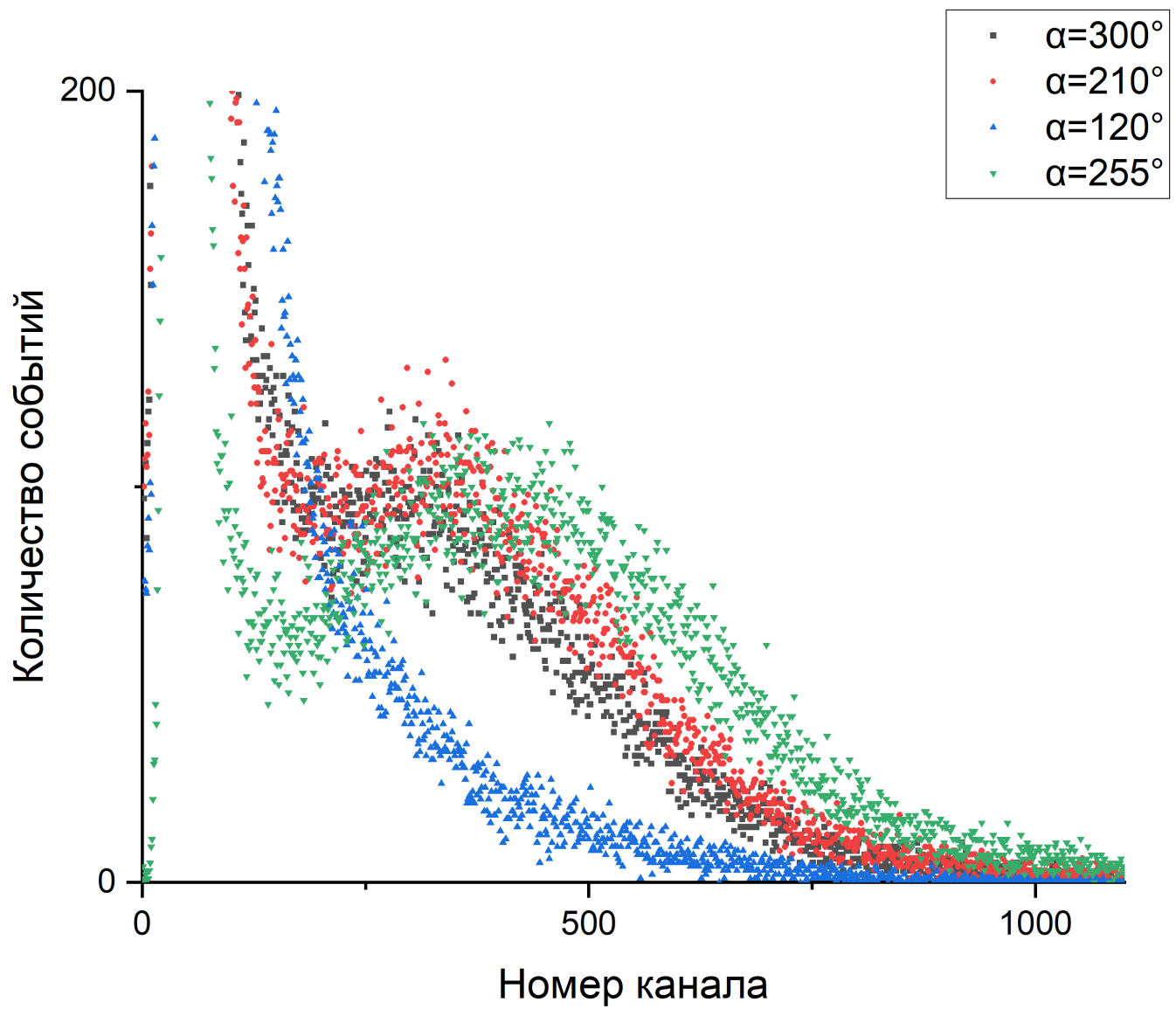


Рисунок 2.17 — Спектры однофотозлектронных импульсов ФЭУ Hamamatsu R12860 при разных положениях магнитном поле Земли

пенсированной компонентой была B_Z , для компенсации данной компоненты сила тока в катушках Гельмгольца составила 4.8 А при напряжении 4.27 В. Коэффициент усиления ФЭУ при компенсированной вертикальной компоненте равен $G = 1.57 \times 10^7$. Затем при компенсированной вертикальной компоненте была дополнительно скомпенсирована компонента X. Для создания противоположно направленного магнитного поля величиной $B_X = 0.17$ Гс сила тока в катушках составила 1.8 А при напряжении 1.15 В. Коэффициент усиления равен $G = 1.85 \times 10^7$. Наконец последней скомпенсированной компонентой была Y составляющая величиной $B_Y = 0.19$ Гс, сила тока в системе компенсации составила 2 А при напряжении 1.34 В. Коэффициент усиления ФЭУ при полной компенсации магнитного поля составил $G = 1.87 \times 10^7$. Зарядовые спектры однофотонных импульсов для разных положений фотоумножителя в естественном магнитном поле Земли представлены на рисунке 2.18.

2.4 Способы экранирования магнитного поля

Применение колец Гельмгольца не всегда возможно по каким-либо причинам, поэтому применяют метод экранирования магнитного поля. Распространенным решением является цилиндр или усеченный конус из листов пермаллоя, размещенных вдоль продольной оси ФЭУ. Такая схема была применена в прототипе детектора Borexino CTF и детекторе Borexino. Магнитный экран детектора Borexino показан на рисунке 1.4 [32].

Технологии экранирования магнитных полей играют важную роль в области чувствительных физических измерений, медицинских исследований и т.д. Технологии магнитного экранирования начали развиваться в 60-ых годах прошлого века и сейчас широко применяется в различных дисциплинах, где изучаются слабые магнитные поля. При внесении магнитного экрана между источником магнитного поля и областью экранирования итоговая форма магнитного поля зависит от геометрии экрана, физических свойства материала и частоты магнитного поля [85—87]. Магнитные экраны преимущественно имеют два типа конструкции: магнитно-экранированные комнаты и цилиндрические экраны. Материалы экранов обуславливают два различных физических меха-

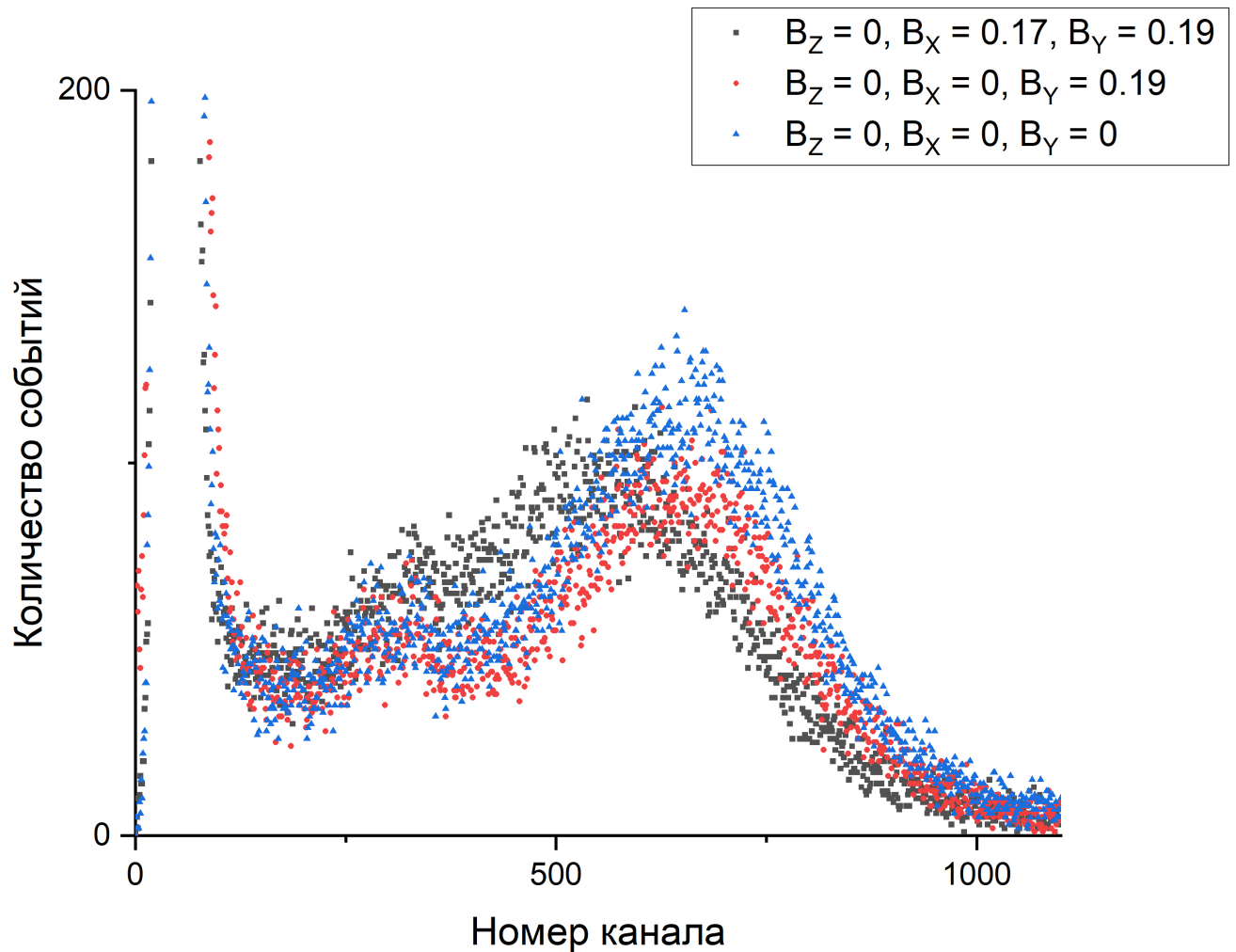


Рисунок 2.18 — Спектры однофотозлектронных импульсов ФЭУ Hamamatsu R12860 при компенсации разных компонент магнитного поля

низма экранирования магнитных полей: шунтирование потока и экранирование с помощью вихревых токов [88].

Механизм шунтирования потока магнитного поля определяется двумя условиями, которые управляют поведением магнитного поля и магнитной индукции на поверхности экрана: законы Ампера и Гаусса требуют, чтобы тангенциальная составляющая магнитного поля и нормальная составляющая магнитной индукции были непрерывными при наличии неоднородностей материала. Следовательно, для того чтобы одновременно удовлетворить обоим условиям, магнитное поле и магнитная индукция могут резко менять направление при пересечении границы раздела двух сред. На границе раздела между воздухом и ферромагнитным материалом экрана, имеющим большую относительную магнитную проницаемость, поле и индукция подходят к фер-

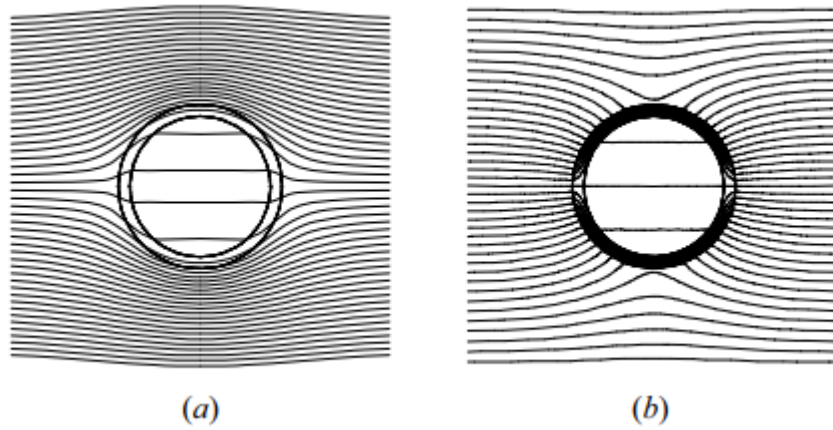


Рисунок 2.19 — Поведение магнитного поля в зависимости от вида экранирования [88].

ромагнитному материалу почти перпендикулярно поверхности, тогда как со стороны ферромагнитного материала они проходят вдоль магнитного экрана почти по касательной к поверхности. Итоговый эффект заключается в том, что магнитная индукция, создаваемая источником, отводится в экран, затем проходит внутри материала в направлении, почти параллельном его поверхности, и, наконец, высвобождается обратно в воздух. На рисунке 2.19 показано поведение магнитного поля при помещении в его объем экрана из материала с высокой магнитной проницаемостью.

Коэффициент экранирования (Shielding factor, SF) является важнейшим показателем для оценки эффективности магнитного экранирования, который определяется как отношение напряженности магнитного поля или магнитной индукции без экранирования и после экранирования в определенном положении. Существуют формулы для расчета коэффициента экранирования, которые получены с помощью численных методов. Расчет коэффициента экранирования для цилиндрического экрана с открытыми торцами производится с помощью формул [89]:

$$SF_T = \frac{\mu_r t}{2R}$$

$$SF_A \approx \frac{2\mu_r t \sqrt{R}}{L^{\frac{3}{2}}},$$

где SF_T и SF_A – перпендикулярный и продольный коэффициенты экранирования; μ_r – относительная магнитная проницаемость; R – радиус экрана, м; L – длина экрана, м; t – общая толщина слоев экрана, м.

Эффективность экранирования определяется магнитной проницаемостью экрана и его геометрией. Экран фактически собирает поток по области, размер которой определяется размером экрана (диаметром), и проводит его через толщину ферромагнитного материала. Магнитная индукция внутри материала экрана увеличивается на коэффициент, определяемый отношением диаметра экрана к толщине. Кроме того, величина магнитной индукции, втянутой в экран, и уменьшение утечки в экранированную область определяются относительной проницаемостью ферромагнитного материала. Эффективность экранирования может быть улучшена путем увеличения относительной проницаемости материала, либо путем увеличения толщины экрана по отношению к его диаметру. Данный метод подходит для экранирования постоянных или низкочастотных магнитных полей, а с увеличением частоты магнитного поля метод, основанный на подавлении вихревых токов начинает играть преобладающую роль. Кремниевая сталь и пермаллой являются самыми распространенными магнитомягкими материалами, которые используются для производства магнитных экранов. Среди всех магнитомягких материалов кремниевая сталь является самым распространенным материалом из-за ее низкой стоимости и превосходных электрических и магнитных свойств. Широко используемые составы для кремниевой стали содержат 6.5% и 3.2% кремния. Оба эти состава обладают превосходными магнитомягкими свойствами, высокой намагниченностью насыщения приблизительно 1.8 и 2.0 Тл, а также высоким электрическим сопротивлением около 82 и 60 мкОм*см соответственно [90]. Пермаллой, также известный как железоникелевый сплав, в основном содержит никель в количестве 30-90%, а также другие добавки, такие как железо, марганец, кремний, молибден и кобальт. Марки пермаллоя с 80% содержанием никеля обладают выраженными магнитно-мягкими свойствами с магнитной проницаемостью высокого уровня, коэрцитивной силой, регулируемой в широком диапазоне от 0.25 А/м до уровня кА/м, и выраженной способностью к холодной прокатке для изготовления. При содержании Ni 75-80% начальная относительная проницаемость может достигать даже более 100000 [91]. Соответственно, пермаллой стал самым популярным выбором для устройств магнитного экранирования [92].

Цилиндрические экраны с открытым основанием достаточно эффективны для снижения составляющей магнитного поля в направлении, перпендикулярном оси. Вдоль оси снижение поля довольно умеренное из-за открытой

структуры. Магнитное поле проникает в отверстие экрана на глубину, сопоставимую с размером отверстия, и стандартная рекомендация состоит в удлинении магнитного экрана примерно на один диаметр за плоскость фотокатода. Однако, увеличение длины магнитного экрана уменьшает количество света, которое попадает на фотокатод. Тем не менее, в связи с тем, что ФЭУ с линейной фокусированной динодной структурой менее чувствительны к полю, направленному вдоль оси фотоумножителя, применение открытого экрана не сильно сказывается на параметрах ФЭУ.

Для более равномерного подавления естественного магнитного поля в ряде экспериментов использовались клетки из пермалловых проволок: DarkSide-50 [93], Antares [94], Baikal-GVD [95]. Использование непрозрачного материала перед фотокатодом приводит к частичному затенению света, что снижает общую эффективность регистрации фотоэлектронов. На практике потери составляют около 5%. Более того, с помощью клетки невозможно добиться существенного снижения магнитного поля, поле уменьшается в 2.0-2.5 раза. Одним серьезным недостатком использования пермалловых экранов (оба типа: как листовых, так и проволочных) является нестабильность эффективности экранирования. Для достижения высокой магнитной проницаемости пермалловые экраны требуют отжига. Магнитные свойства экрана могут ухудшаться из-за механических напряжений. В связи с этим клетки крайне чувствительны к условиям транспортировки и обработки - любая механическая деформация может привести к частичной потере магнитных свойств. При использовании в низкофоновых детекторах магнитный экран не должен вносить существенного вклада в общий радиоактивный фон. На практике радиоактивный фон экрана должен быть ниже, чем у ФЭУ. С этой точки зрения клетки менее радиоактивны по сравнению с цельнометаллическими экранами из-за меньшего количества используемого материала. Тем не менее, современным ФЭУ с фотокатодом диаметром 20 дюймов потребуется несколько килограммов материала для обеспечения разумного экранирования. В настоящее время получают распространение многослойные экраны, которые изготавливаются с помощью метода электролитического осаждения [96], например разработаны магнитные экраны, выполненные из чередующихся немагнитных (медь, алюминий, латунь) и магнитных (сталь, пермаллой) слоев, такие экраны имеют экранирующий эффект в 1.5-2 раза больший, чем однослойный экран той же толщины [97]; также существуют многослойные электромагнитные экраны, выполненные из

магнитного (Co-Ni) и немагнитного материала (Cu) [98]; многослойный электромагнитный экран, содержащий магнитные слои из аморфного сплава Co-Fe-P и немагнитные медные слои, отличительная особенность экрана состоит в том, что медные слои выполнены толщиной 1-25 мкм, суммарная толщина экрана составляет 150-350 мкм, общее количество слоев достигает 98 [99; 100]

Механизм экранирования с помощью вихревых токов определяется вихревыми токами, которые возникают в материале экрана из-за наличия, изменяющегося во времени внешнего магнитного поля. Когда экран подвергается воздействию изменяющегося магнитного поля, внутри экрана индуцируется электрическое поле, которое описывается законом Фарадея, а когда экран обладает высокой проводимостью, возникает плотность индуцированного тока, которая описывается законом Ома. Плотность индуцированного электрического тока приводит в действие магнитное поле, противоположное внешнему полю, которое «отталкивается» металлом и вынуждено проходить параллельно поверхности экрана, создавая небольшую магнитную индукцию внутри металла. На рисунке 2.19 показано поведение магнитного поля при помещении в него экрана, состоящего из материала с высокой проводимостью. В отличие от механизма шунтирования, подавление вихревых токов происходит только тогда, когда внешнее магнитное поле изменяется во времени. Этот механизм возникает в любом электропроводящем материале, независимо от значений относительной магнитной проницаемости.

2.5 Исследование характеристик ФЭУ при использовании магнитного экрана

Измерения с магнитным экраном проводились для фотоумножителя ХР2982 от компании Philips. ФЭУ обладает бищелочным, сурьмяно-калиево-цезиевым фотокатодом. Эффективная область фотокатода имеет размер 23 мм. По результатам измерений, представленным в разделе 2.3, видно, что наиболее чувствительной осью ФЭУ является ось направленная параллельно первому диноду в то время, как продольная ось наименее чувствительна к воздействию магнитного поля. Поэтому использование магнитного экрана является хорошим способом для устранения влияния магнитного поля, так как экран снижает

две компоненты магнитной индукции. В качестве магнитного экрана была использована тонкая лента из магнитомягкого материала, которая оборачивалась одним слоем вокруг фотоумножителя, чтобы поперечные оси ФЭУ были экранированы. Измерения проводились в четыре этапа. Первые три этапа включали измерения в условиях естественного магнитного поля Земли без применения экрана. Фотоумножитель был установлен на поворотной платформе и вращался в вертикальной плоскости вокруг своей центральной точки с шагом 30° , по часовой стрелке. В исходном положении фотокатод был направлен вниз. Выход оптоволокну располагался вплотную к фотокатоду. Рабочее напряжение ФЭУ составляло 1200 В. Уровень засветки фотокатода подбирался так, чтобы основная часть регистрируемых сигналов соответствовала однофотоэлектронным импульсам фотоумножителя.

На первом этапе угол между поверхностью первого динода и магнитным севером составлял 0° . По результатам были построены зарядовые спектры однофотоэлектронных импульсов и рассчитаны коэффициенты усиления для каждого положения. Разброс коэффициента усиления составил 4.7%. На втором этапе угол составлял 45° , при этом разброс усиления уменьшился до 2.5%. На третьем этапе, при угле 90° , разброс составил 3.5%.

На четвертом этапе измерения проводились с установленным магнитным экраном. Изменение коэффициента усиления составило 3.5%. Однако во всех ориентациях ФЭУ коэффициент усиления при наличии экрана превышал соответствующее значение без него. Максимальное различие в усилении между экранированным и неэкранированным состоянием достигало 10% (Рис. 2.20).

2.6 Заключение к главе 2

В главе были рассмотрены основные характеристики магнитного поля Земли, а также методы его компенсации: активный и пассивный методы. Активный метод компенсации магнитного поля основан на применении специальных катушек Гельмгольца, которые создают дополнительное магнитное поле, направленное в противоположную сторону по отношению к внешнему полю. В результате их взаимодействия происходит взаимная компенсация, и суммарное магнитное поле становится равным нулю. К основным преимуществам

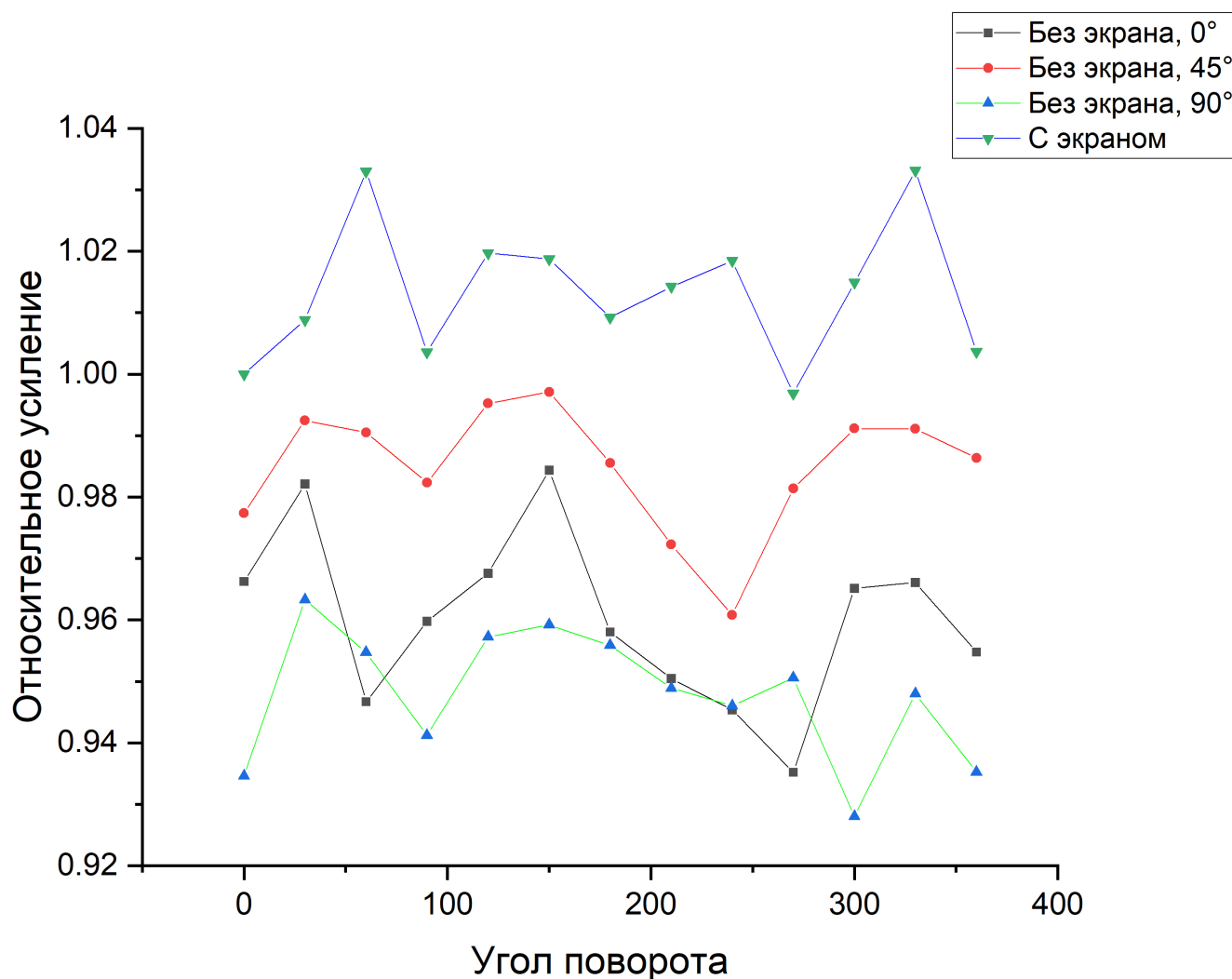


Рисунок 2.20 — Зависимость коэффициента усиления ФЭУ с магнитным экраном и без него от положения фотоумножителя в пространстве.

этого подхода относится высокая эффективность компенсации сильных магнитных полей в больших объемах пространства, низкая стоимость реализации и простота установки. Кроме того, данный метод обеспечивает более точное управление компенсационным полем с учетом изменений внешних условий. В случае невозможности установки колец Гельмгольца применяют метод пассивного экранирования магнитного поля. Распространенным решением является цилиндр или усеченный конус из листов пермаллоя, размещенных вдоль продольной оси ФЭУ. Также были проведены измерения влияния магнитного поля на параметры фотоэлектронных умножителей, для этого был разработан измерительный стенд, в котором компенсация и создание дополнительного магнитного поля осуществляется с помощью катушек Гельмгольца. По результатам измерений Наиболее чувствительной оказалась ось, ориентированная

вдоль поверхности первого динода, соответствующая вертикальной компоненте магнитного поля. При изменении этой компоненты коэффициент усиления ФЭУ Hamamatsu R7081-100 WA-S70 изменялся примерно на 22%, а отношение пик/долина снижалось почти в четыре раза. Для ФЭУ Hamamatsu R12860 разброс коэффициента усиления составил 35%. Также проводились измерения с использованием магнитного экрана для ФЭУ XP2982 от компании Philips. Максимальное различие в усилении между экранированным и неэкранированным состоянием достигало 10%. Результаты главы приведены в работах [П.1, П.7].

Глава 3. Система компенсации магнитного поля для прототипа ББНТ с массой мишени 5 тонн

3.1 Проект Баксанского большого нейтринного телескопа

Проект Баксанского большого нейтринного телескопа разрабатывается Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН, которая расположена в Баксанском ущелье Приэльбрусья под толщей горы Андырчи. Обсерватория включает в себя комплекс подземных сооружений, располагающихся в двух параллельных штольнях длиной около 4 км, и наземную инфраструктуру.

На первом этапе реализации проекта Баксанского большого нейтринного телескопа происходила разработка и создание прототипа детектора с массой жидкого сцинтиллятора около 0.5 тонны. Установка располагается в экспериментальном зале лаборатории галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ). Подземная часть лаборатории расположена в 3.5 км от входа в штольню, экспериментальный зал длиной 60 м, шириной 10 м и высотой 12 м представляет собой основное помещение лаборатории. Толща горных пород, расположенных над лабораторией, обеспечивает защиту от мюонов космических лучей, соответствующую 4700 м.в.э, снижающая поток мюонов в 10^7 раз. Измеренный поток мюонов составляет $(3.03 \pm 0.10) \times 10^{-9} (\text{см}^2 \times \text{с})^{-1}$. Для уменьшения фона от нейтронов и гамма-излучения, исходящего от горных пород, помещение облицовано низкорadioактивным бетоном толщиной 60 см и покрыто стальными листами толщиной 6 мм. Поток нейтронов с энергией выше 1 МэВ не превышает $1.40 \times 10^7 (\text{см}^2 \times \text{с})^{-1}$ [101].

Цель первого этапа — изучение особенностей проектирования и эксплуатации детекторов на основе жидких сцинтилляторов. В рамках работ производилась отработка технологий очистки сцинтилляторов для достижения высокой оптической и радиационной чистоты, разработка методов исследования их физических свойств, а также характеристик вакуумных фотодетекторов. Кроме того, осуществлялся подбор конструкционных материалов и исследование их параметров, проектирование и создание системы регистрации сигналов с

соответствующим программным обеспечением, проведение калибровочных измерений и отработка методик анализа данных.

Прототип имеет двухзонную конструкцию: центральная зона, служащая мишенью для нейтрино, представляет собой акриловую сферу радиусом 0.48 м, заполненную сверхчистым жидким сцинтиллятором. Вокруг сферы располагаются двадцать 10-дюймовых ФЭУ Hamamatsu R7081-100 WA-S70, смонтированных на стальном каркасе. ФЭУ имеет высокую квантовую эффективность 35% в диапазоне длин волн от 360 до 430 нм. Резервуар, заполненный сверхчистой водой, служит для защиты от внешней радиоактивности, толщина слоя воды на экваторе сферы составляет 70 см. Вода проходит через систему очистки и хранения, которая включает освещение, обезжелезивание, дехлорирование, умягчение, дезинфекцию и аэрацию. Радиоактивный фон всех материалов детектора измерялся в низкофоновой лаборатории БНО. Основой жидкого сцинтиллятора является линейный алкилбензол, очищенный от радиоактивных и других примесей. В качестве первичной сцинтилляционной добавки был добавлен РРО в концентрации 2 г/л. В качестве спектросмещающей добавки используется bis-MSB в концентрации 10 мг/л для соответствия спектра излучения сцинтиллятора и спектра пропускания акрила [102]. Система компенсации магнитного поля для данной установки не предусмотрена.

3.2 Конструкция прототипа ББНТ с массой мишени 5 тонн

Второй прототип детектора с массой мишени 5 тонн находится на стадии сборки. Детектор состоит из двух зон. Акриловая сфера, заполненная жидким сцинтиллятором, имеет увеличенный до 1.1 м радиус. Высота водного резервуара составляет 4 м, а радиус 2 м, толщина водного слоя – 0.9 м. Сорок два 10-дюймовых ФЭУ Hamamatsu R7081-100 WA-S70 просматривают акриловую сферу. Также в конструкцию детектора были добавлены двенадцать 8-дюймовых ФЭУ Hamamatsu R5912-100 WA-S70, которые используются в системе мюонного вето.

Водный резервуар прототипа выполнен из нержавеющей стали марки 316l и представляет собой цилиндр диаметром 4 м и высотой 4.36 м, чертеж емкости показан на рисунке 3.1. Емкость оснащена люком для доступа к внутреннему

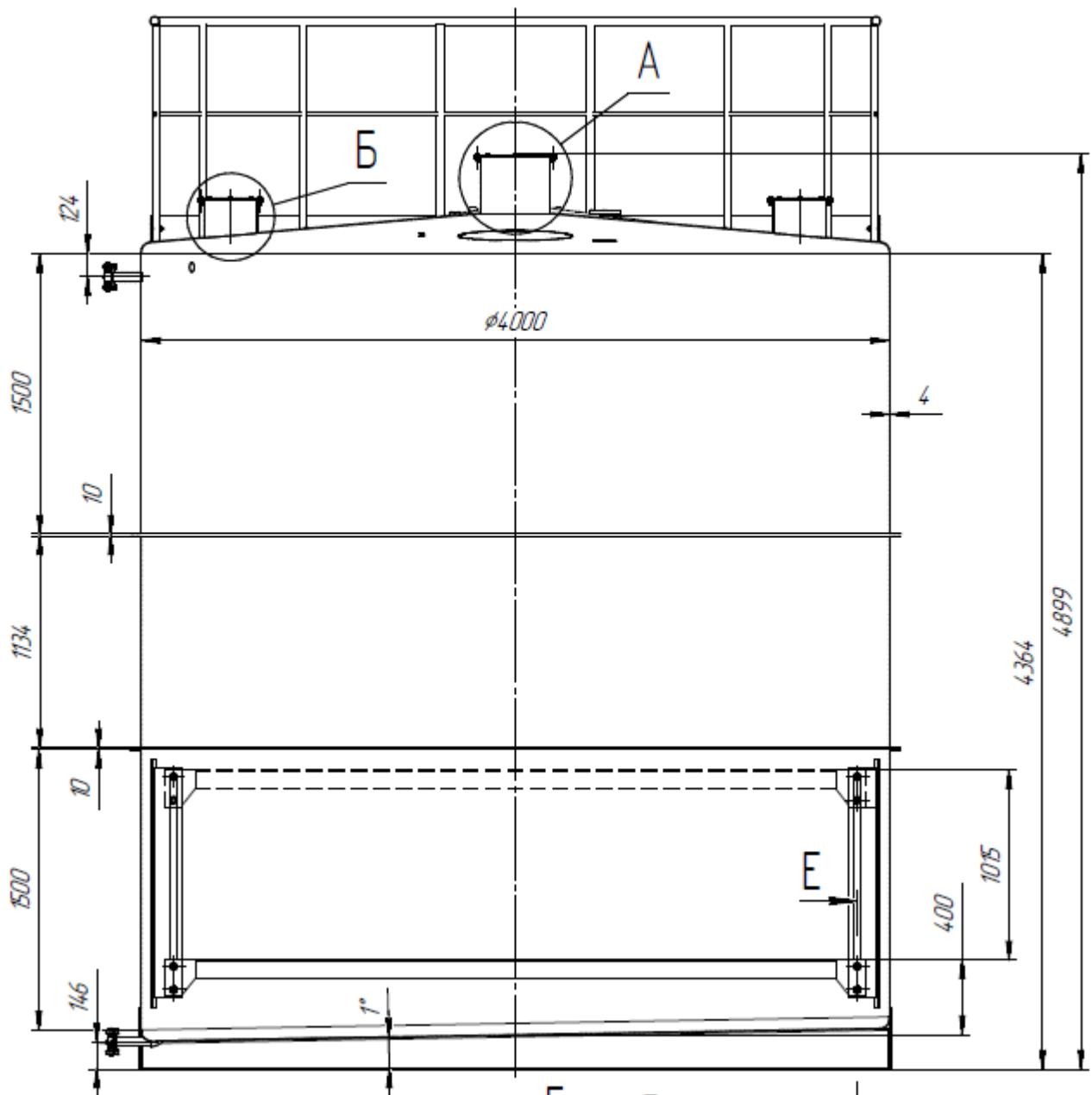


Рисунок 3.1 — Чертеж водного резервуара прототипа с массой мишени 5 тонн.

объему, а также двумя люками для вывода кабелей фотоумножителей, которые также можно использовать для вывода кабелей системы компенсации.

Внутри резервуара располагается металлический каркас. Каркас в средней части представляет собой три кольца с 12 вертикальными стойками. Верхняя и нижняя - усеченная пирамида с двенадцатью гранями, ребра которой сходятся в кольцо с внутренним диаметром 1157 мм. Материал каркаса – нержавеющая сталь марки 316l, диаметр соединительных стоек 3 см. Ребра пирамиды повернуты относительно вертикальных стоек средней части на 15 градусов. Общая высота каркаса составляет 3.75 м, а диаметр 3.2 м. На каркасе располагаются 42 ФЭУ Hamamatsu R7081-100 WA-S70, просматрива-

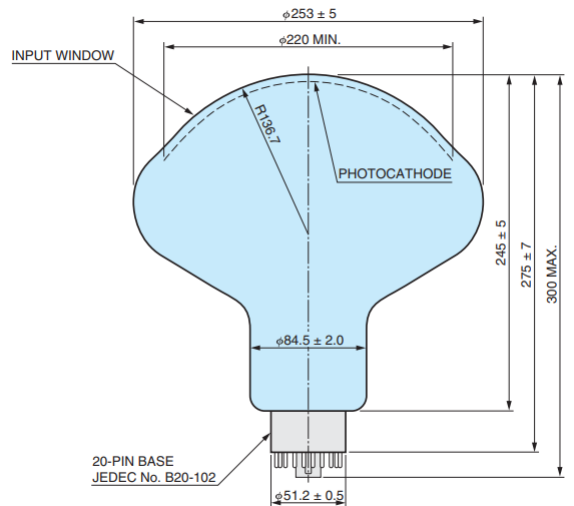


Рисунок 3.2 — Размеры фотоумножителя Hamamatsu R7081-100.

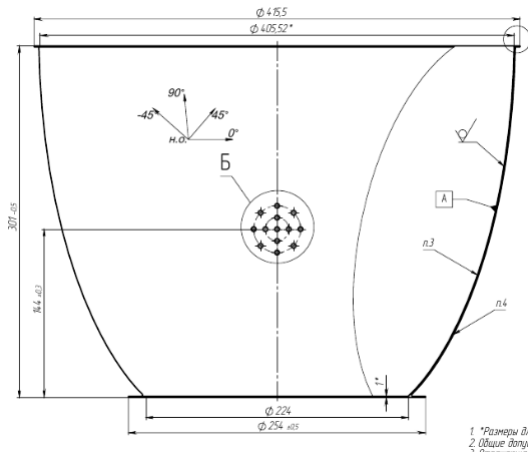


Рисунок 3.3 — Размеры концентратора света, разработанного для ФЭУ Hamamatsu R7081-100.

ющие мишень. В области верхнего и нижнего опорных колец располагаются 6 фотоумножителей, на ребрах усеченной пирамиды расположены 12 ФЭУ, на вертикальных стойках средней части размещены 24 ФЭУ. Концентраторы света также предусмотрены в конструкции детектора [103]. Чертеж каркаса с расположенными на нем ФЭУ и концентраторами показан на рисунке 3.4. Расстояние от сферы до каркаса в средней части составляет 60 см, расстояние от сферы до стенки резервуара – 90 см. Длина ФЭУ составляет 30 см, длина концентратора – 30 см. На рисунках 3.2 и 3.3 приведены полные размеры фотоумножителя и конуса Уинстона.

На основании международной аналитической модели геомагнитного поля (IGRF-13) установлено, что в районе размещения прототипа ББНТ значения компонент полного вектора магнитного поля Земли составляют: $B_X = 0.23$ Гс, $B_Y = 0.03$ Гс, $B_Z = 0.44$ Гс. Для снижения фонового гамма-излучения, обуслов-

ленного радиоактивностью окружающих горных пород, стены главного зала лаборатории Галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) были экранированы стальными листами, что привело к искажению локальной структуры магнитного поля. С целью учёта влияния металлической обшивки и магнитных свойств горных пород были проведены дополнительные измерения индукции магнитного поля непосредственно в зоне предполагаемой установки детектора. По результатам измерений зафиксированы отклонения от расчётных значений: $B_X = 0.15$ Гс, $B_Y = -0.22$ Гс, $B_Z = 0.25$ Гс; горизонтальная составляющая магнитного поля составила $H = 0.26$ Гс.

3.3 Конфигурации системы магнитной компенсации

Для снижения внешнего магнитного поля применяются три основных подхода: компенсация отдельных компонент поля, раздельная компенсация горизонтальной и вертикальной компонент, а также компенсация полного вектора магнитной индукции. Первый метод, основанный на компенсации каждой компоненты по отдельности, используется в случаях, когда объем области с требуемым ослаблением поля сравнительно невелик. Это связано с тем, что зона, в пределах которой создается однородное поле, имеет форму куба со стороной, примерно вдвое меньшей диаметра колец Гельмгольца. Компенсация полного вектора магнитной индукции реализуется путем размещения системы колец Гельмгольца вдоль направления магнитного поля. Такой подход оптимален для сферических объемов и применяется, например, в эксперименте JUNO [52]. Фотоэлектронные умножители мюонного вето и центрального детектора расположены в непосредственной близости к мишени, что позволяет разместить компенсирующие катушки рядом с ФЭУ. При необходимости компенсации поля в цилиндрических объемах используется второй подход — независимая компенсация горизонтальной и вертикальной компонент. Данная стратегия реализована, в частности, в экспериментах SNO [28], Super-Kamiokande [25] и Hyper-Kamiokande [58].

Для катушек Гельмгольца, предназначенных для компенсации горизонтальной компоненты магнитного поля, рассматриваются три варианта конфигурации их размещения. Во всех случаях система состоит из шести вер-

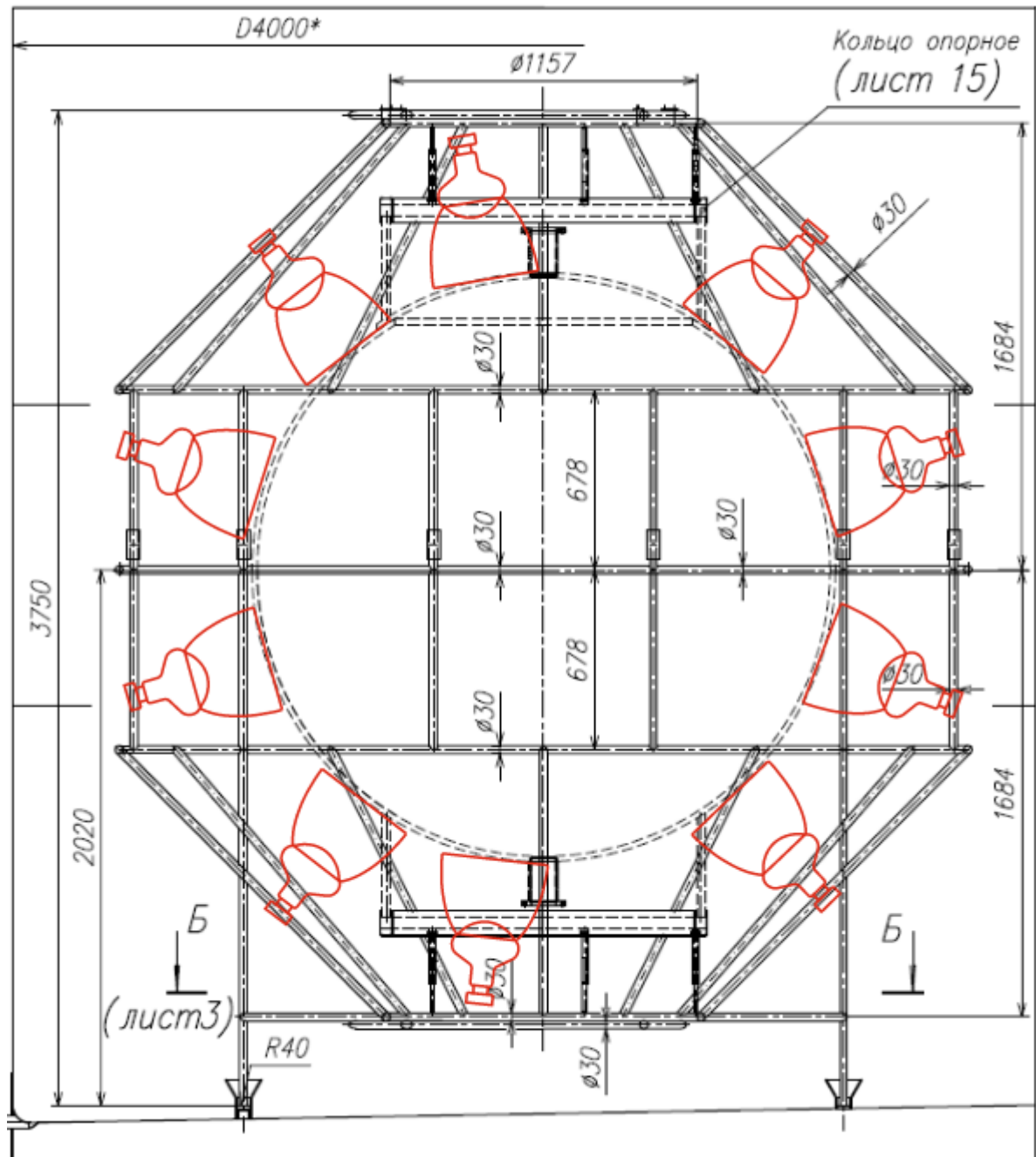


Рисунок 3.4 — Чертеж каркаса 5-тонного прототипа ББНТ с размещенными на нем ФЭУ с концентраторами света.

тикально ориентированных колец, пересекающихся вдоль оси цилиндрического объема. Отличия между конфигурациями связаны со способом крепления колец:

1. на вертикальных стойках каркаса
2. с выносом колец на 20 см за пределы каркаса
3. на внутренней поверхности стенок водного резервуара

Крепление колец на каркасе детектора позволяет упростить конструкцию и облегчить процесс монтажа, поскольку сборка системы компенсации осуществляется вне водного резервуара. Вместе с тем, вблизи проводников формируются локальные зоны повышенной магнитной индукции с выраженным градиентом, величина которого экспоненциально снижается с расстоянием от источника. С учетом того, что фотоэлектронные умножители, оснащенные концентраторами света, будут размещены в непосредственной близости к каркасу, локальные возмущения магнитного поля могут приводить к снижению коэффициента усиления и ухудшению временных характеристик ФЭУ. Следовательно, при проектировании системы компенсации необходимо учитывать потенциальное негативное влияние остаточных магнитных полей на чувствительность и стабильность работы детектора. Для того, чтобы оценить возможность осуществления данного вида крепления было проведено моделирование системы компенсации магнитного поля данной конфигурации, а также рассчитано создаваемое магнитное поле. За основу расчетов был взят цилиндр высотой 3.7 м и диаметром 3.2 м. Расчет проводился в несколько этапов:

- каждая катушка разбивается на множество секций длиной 10 см
- определяются трехмерные координаты для каждой секции
- создается облако точек пространства, для которого необходимо рассчитать индукцию
- с помощью формулы Био-Савара-Лапласа для каждой точки объема рассчитывается магнитная индукция от всех секций катушек
- суммирование магнитной индукции для всех точек пространства точке от каждого кольца
- вычитание внешнего магнитного поля из создаваемого катушками

В результате были построены карты остаточного магнитного поля для трех верхних ярусов расположения ФЭУ 3.5 — 3.7.

Как видно из приведенных рисунков катушки создают магнитное поле, которое имеет увеличенные значения в непосредственной близости от провод-

$Z=3.5 \text{ M}$

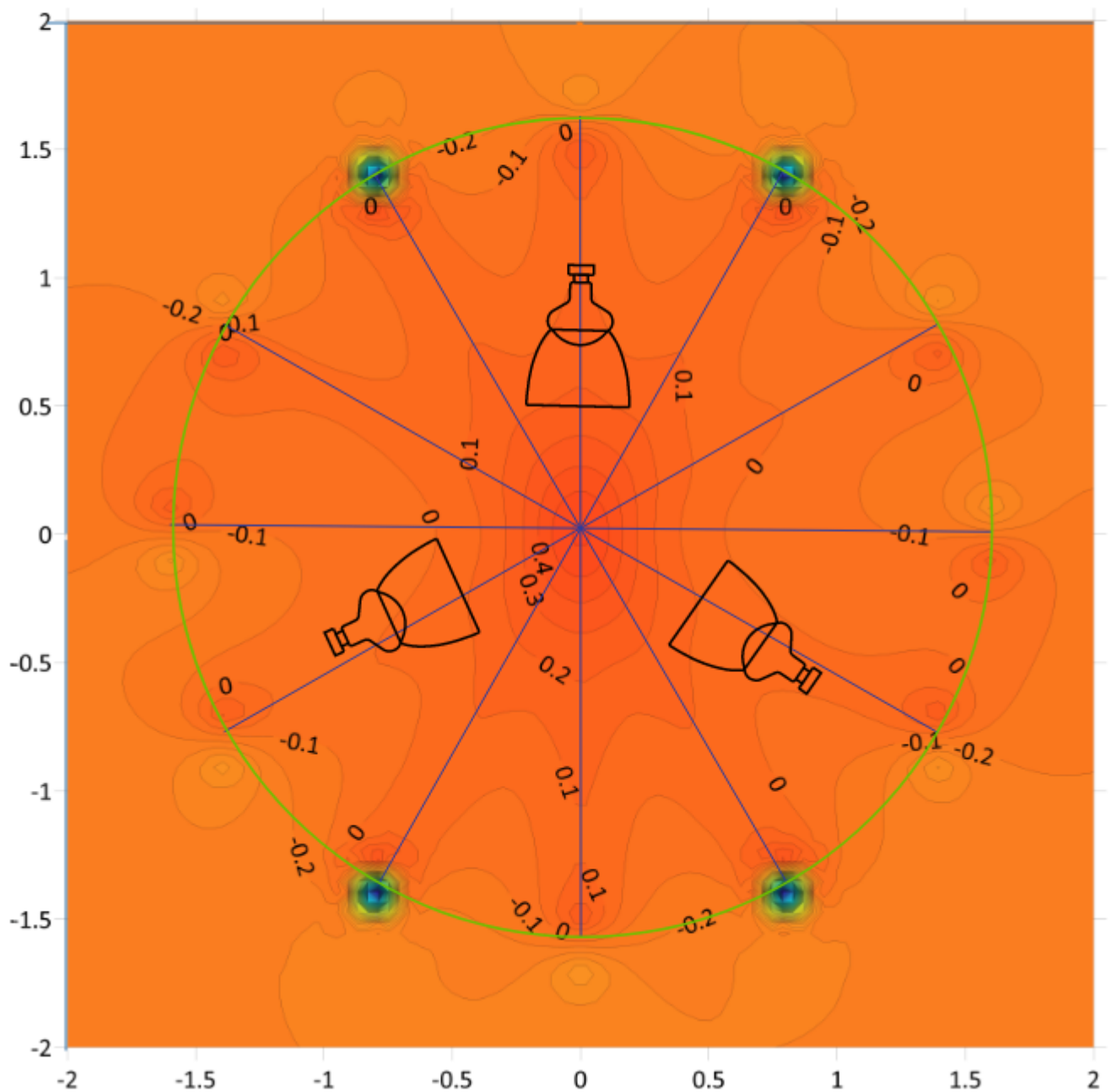


Рисунок 3.5 — Карта остаточного магнитного поля на высоте 3.5 м, в районе расположения 3 яруса ФЭУ при креплении колец Гельмгольца на каркасе.

$Z=3 \text{ M}$

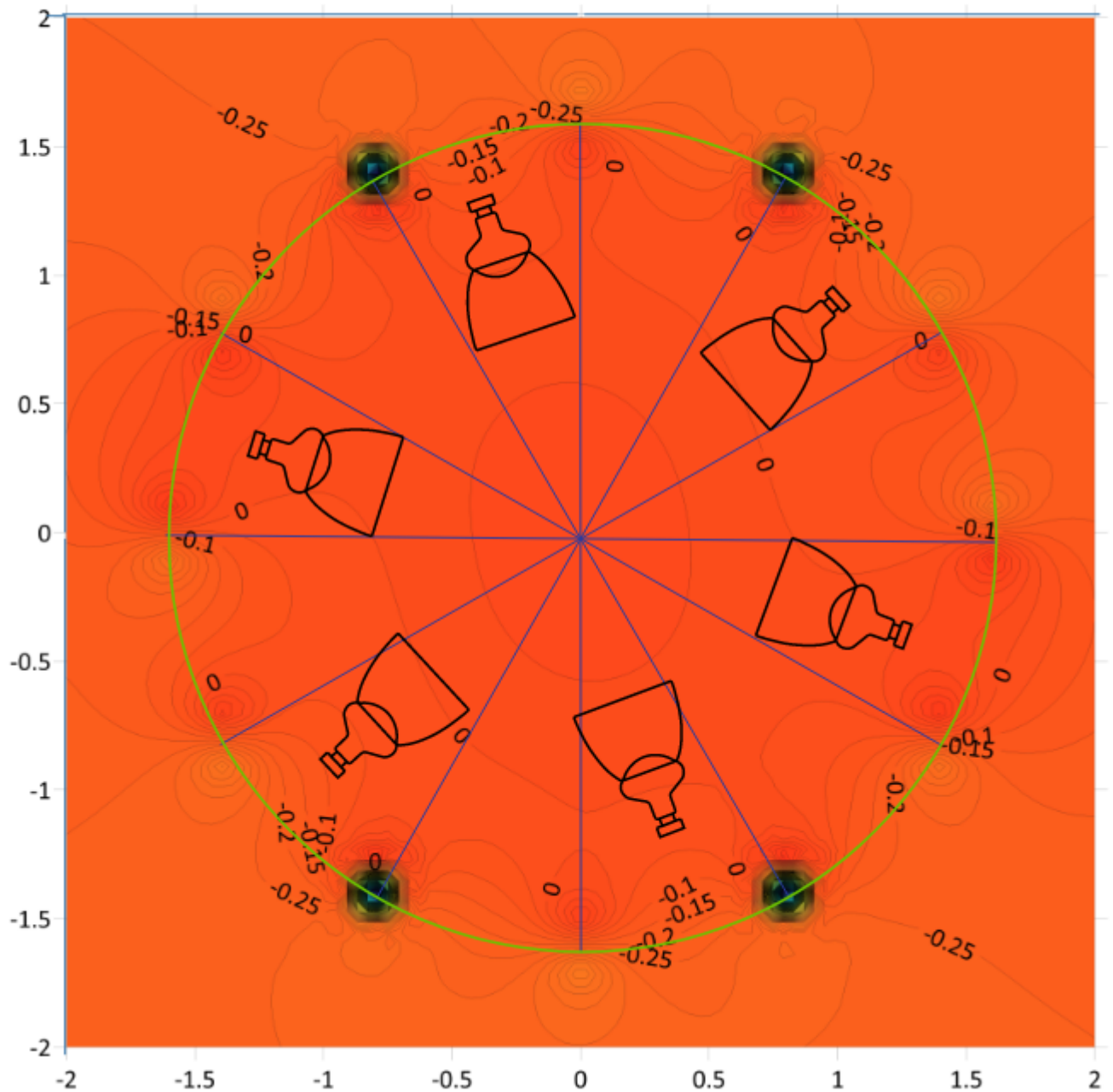


Рисунок 3.6 — Карта остаточного магнитного поля на высоте 3 м, в районе расположения 2 яруса ФЭУ при креплении колец Гельмгольца на каркасе.

$Z=2.4 \text{ M}$

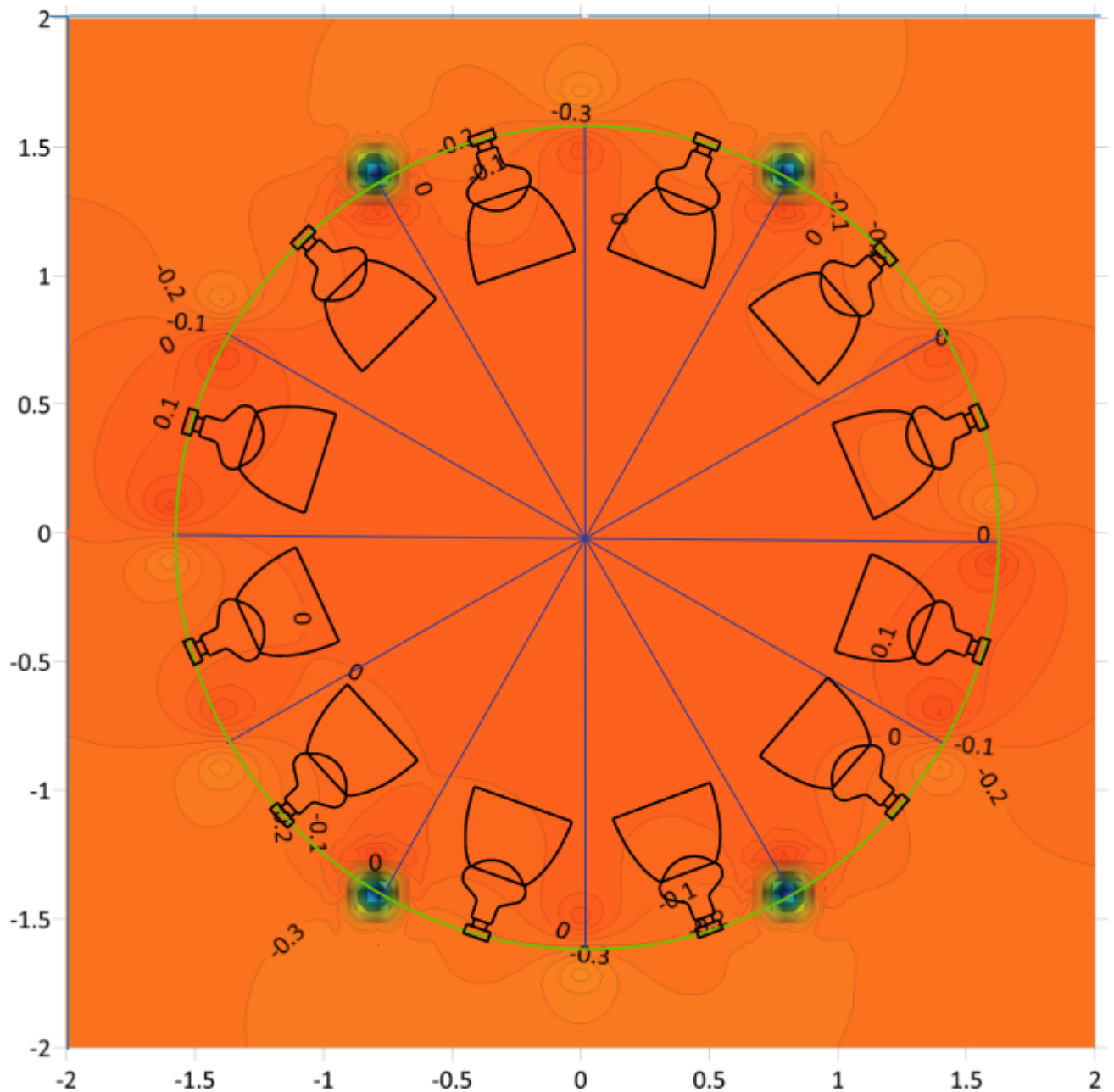


Рисунок 3.7 — Карта остаточного магнитного поля на высоте 2.4 м, в районе расположения 1 яруса ФЭУ при креплении колец Гельмгольца на каркасе.

ников, а также в центре основания и крышки цилиндра. Увеличение магнитной индукции в этом месте обусловлено наложением кабелей, вследствие чего магнитное поле от всех катушек складывается. Данной области соответствует нижний и верхний ярусы расположения фотоумножителей, которые содержат по три ФЭУ. При этом фотоумножители можно расположить так, чтобы они не попадали в область с повышенным магнитным полем. Для всех ярусов ФЭУ остаточное магнитное поле составляет от 0 до 0.1 Гс, что соответствует изменению коэффициента усиления фотоумножителя до 5% для самой чувствительной оси. При этом количество ФЭУ, для которых остаточное магнитное поле ниже 0.05 Гс, составляет 22, ФЭУ с полем от 0.05 до 0.1 Гс - 14 и 5 ФЭУ с полем больше 0.1 Гс.

Создаваемая магнитная индукция снижается пропорционально квадрату расстояния до точки наблюдения, поэтому увеличения расстояния от проводников до ФЭУ позволит снизить остаточное магнитное поле. Для оценки возможного устранения локальных зон с повышенными значениями магнитного поля были проведены расчеты остаточного магнитного поля для колец Гельмгольца, вынесенных за каркас на 20 см.

Такое крепление колец не усложняет конструкцию детектора при этом позволяет снизить остаточное поле для всех фотоумножителей. Для всех ярусов ФЭУ остаточное магнитное поле составляет от 0 до 0.15 Гс, что соответствует изменению коэффициента усиления ФЭУ менее 7% для самой чувствительной оси фотоумножителя. При этом количество ФЭУ, для которых остаточное магнитное поле ниже 0.05 Гс, составляет 34, ФЭУ с полем от 0.05 до 0.1 Гс - 6, и 2 ФЭУ с полем 0.15 Гс. Размещение колец на стенках водного резервуара позволит еще сильнее расширить область однородного поля.

Для компенсации горизонтальной составляющей магнитного поля была выбрана третья конфигурация колец Гельмгольца с размещением на стенках водного резервуара, включающая 6 катушек по 7 витков в каждой при силе тока 3.5 А. Такая конфигурация позволит снизить уровень остаточного магнитного поля до околонулевых значений. Угол между катушками составляет 30°. Вертикальная компонента компенсируется 5 кольцами с 10 витками в каждом при силе тока 3.5 А, расстояние между катушками составляет 1 м. Для данного типа колец также рассматривалось 3 вида крепления. Были выбраны катушки радиусом 2 м, так как такая конфигурация облегчит монтаж. Остаточ-

$Z=3.5 \text{ M}$

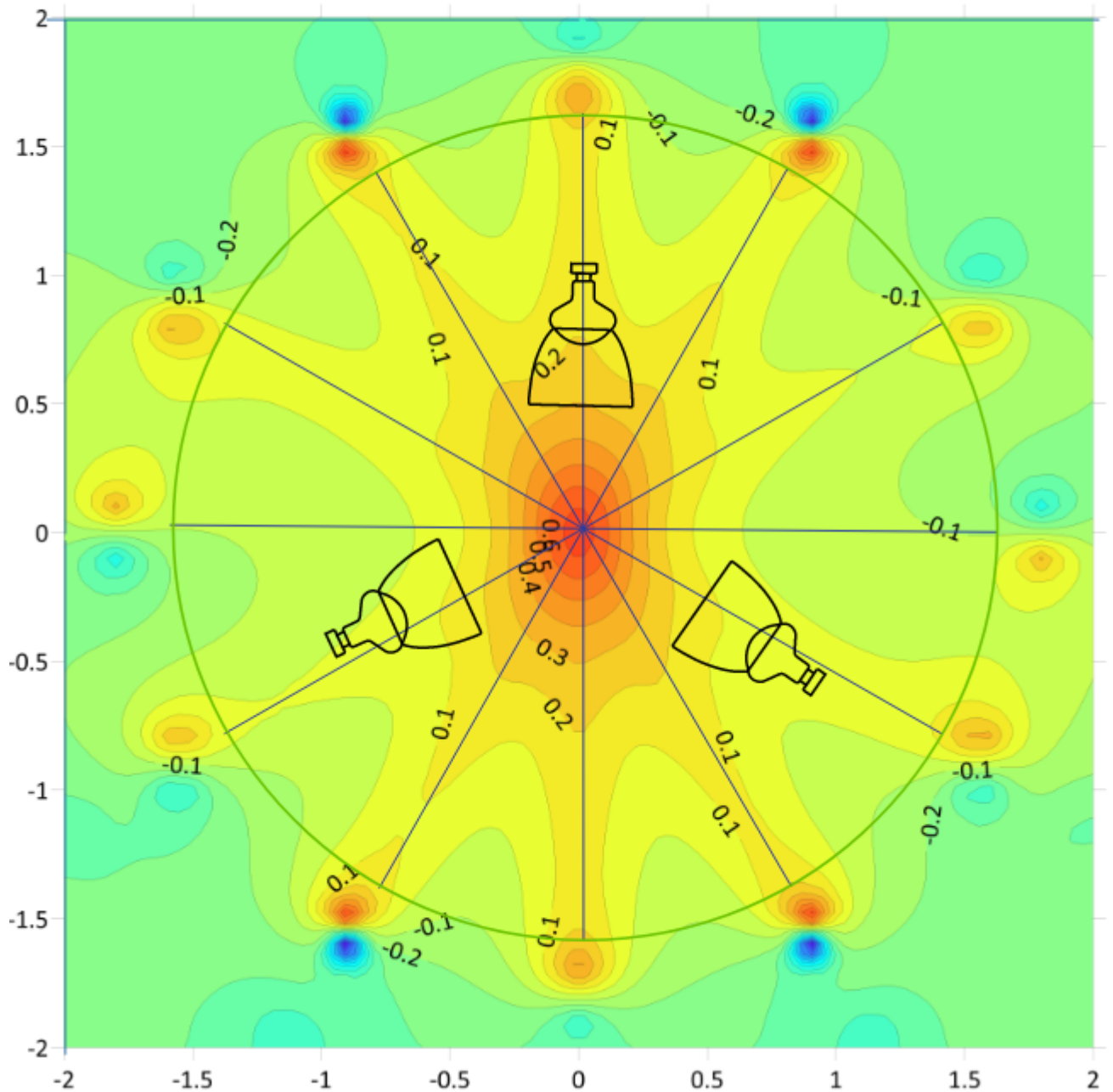


Рисунок 3.8 — Карта остаточного магнитного поля на высоте 3.5 м, в районе расположения 3 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца в 20 см от каркаса.

$Z=3 \text{ M}$

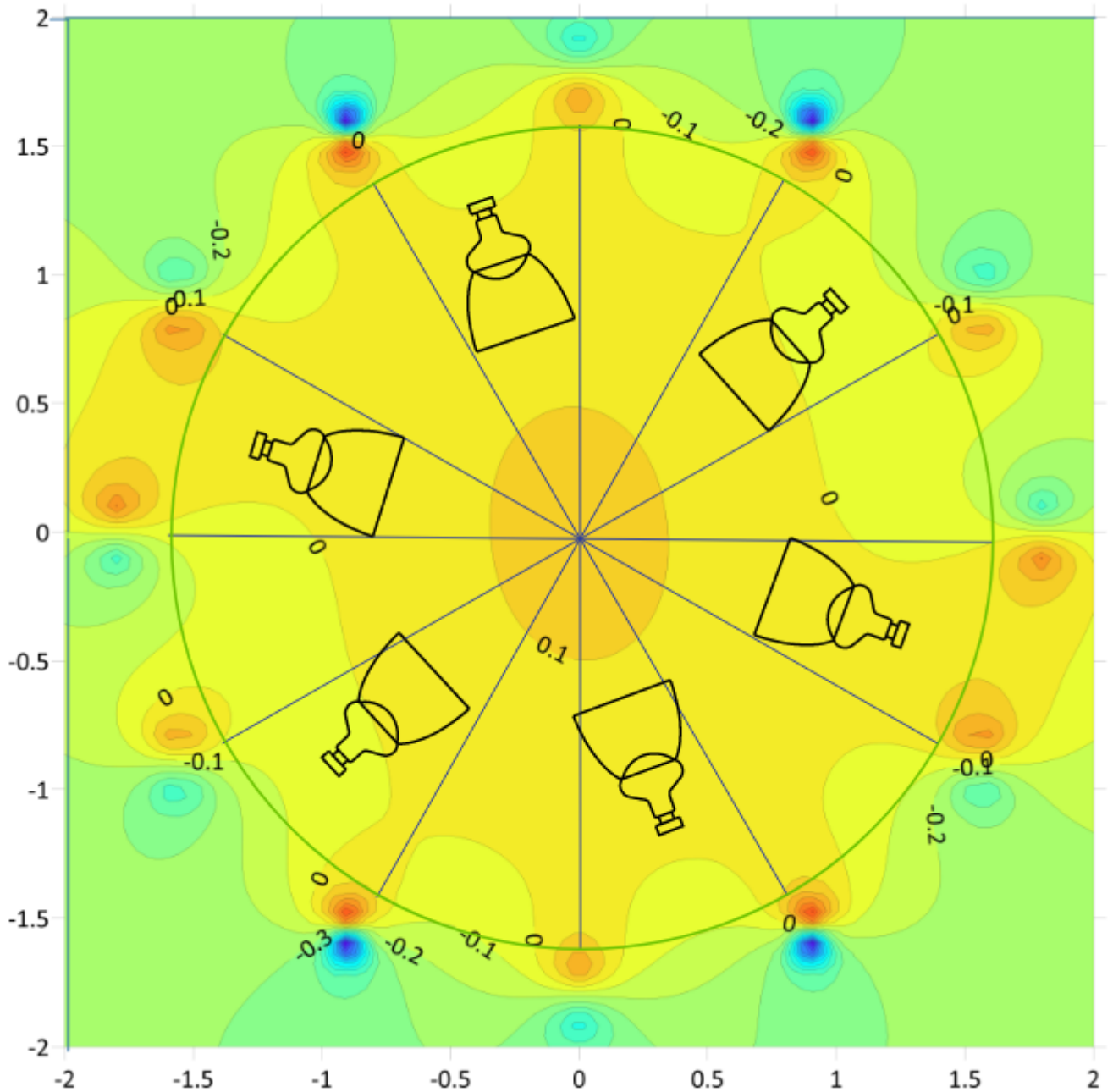


Рисунок 3.9 — Карта остаточного магнитного поля на высоте 3 м, в районе расположения 2 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца в 20 см от каркаса.

$Z=2.4 \text{ M}$

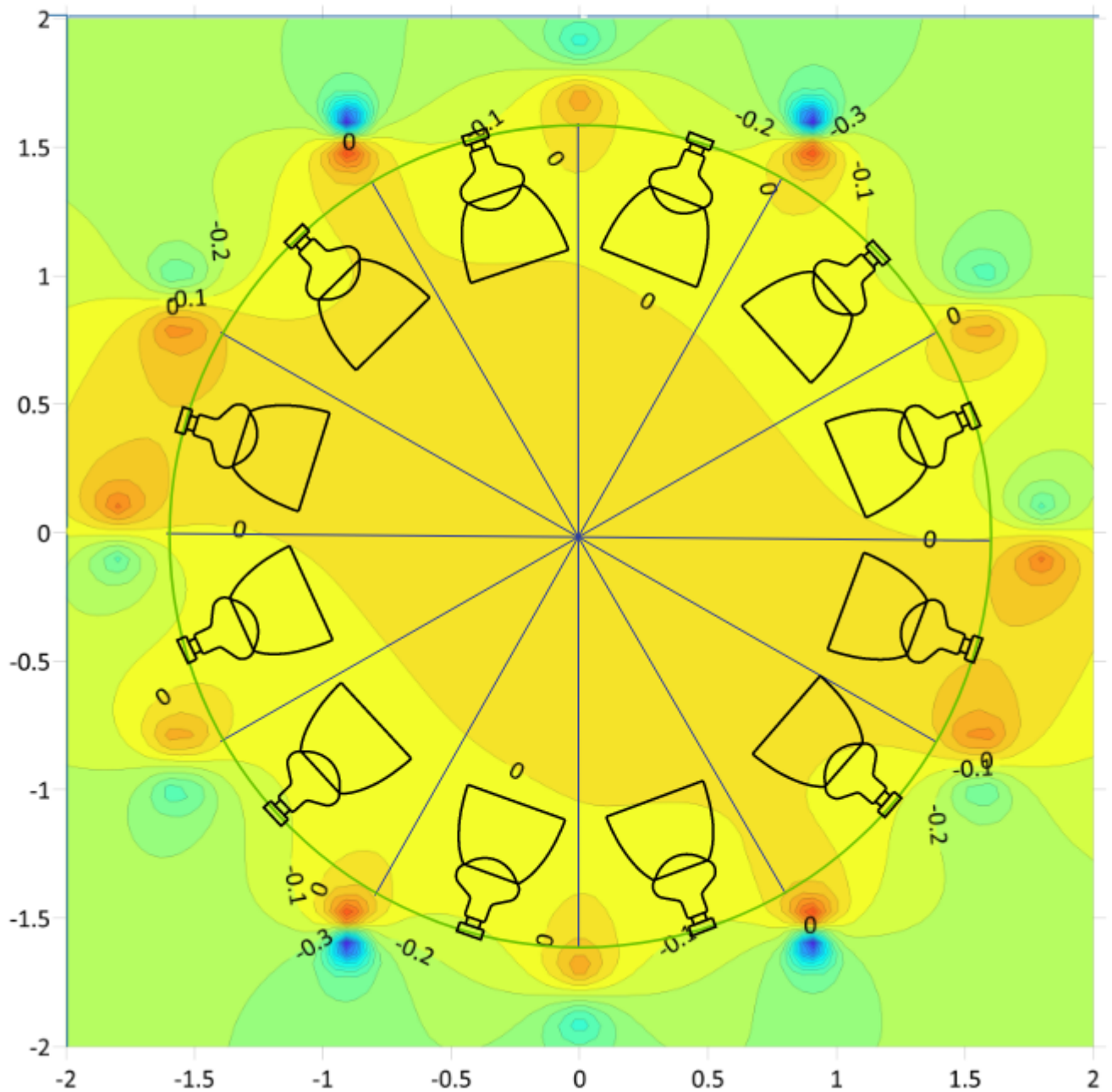


Рисунок 3.10 — Карта остаточного магнитного поля на высоте 2.4 м, в районе расположения 1 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца в 20 см от каркаса.

$Z=3.5 \text{ M}$

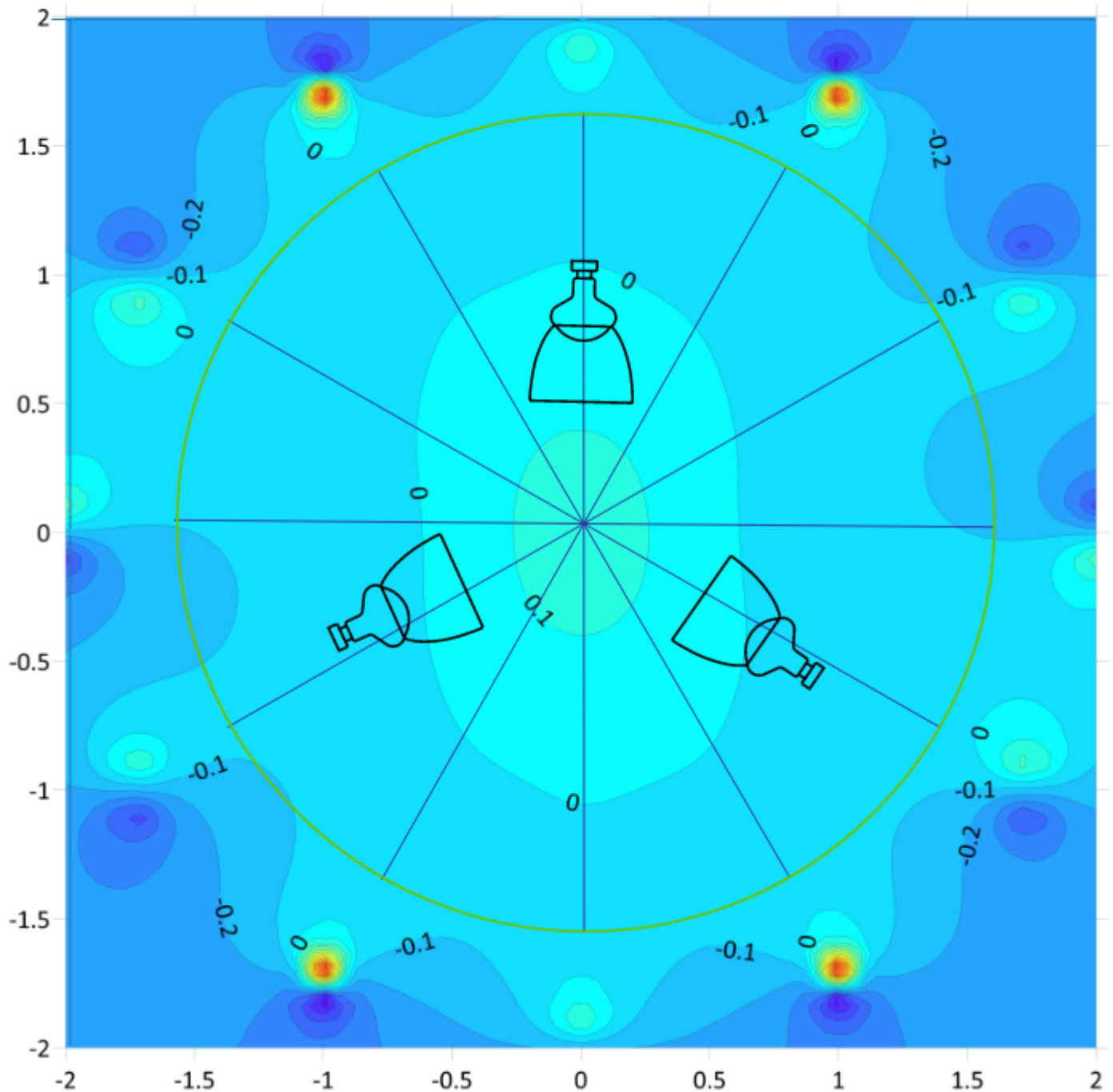


Рисунок 3.11 — Карта остаточного магнитного поля на высоте 3.5 м, в районе расположения 3 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара.

Z=3 M

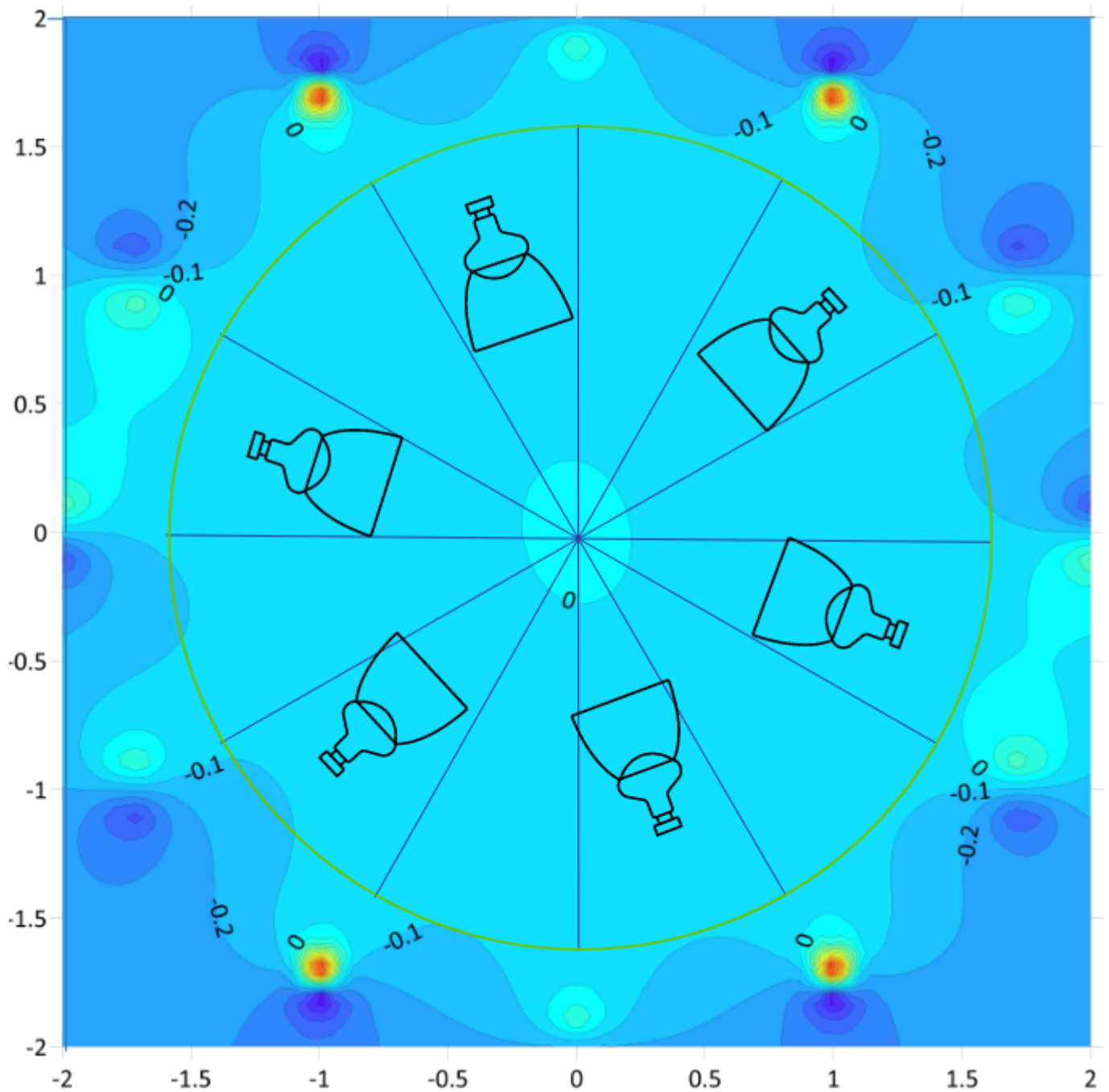


Рисунок 3.12 — Карта остаточного магнитного поля на высоте 3 м, в районе расположения 2 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара.

$Z=2.4 \text{ M}$

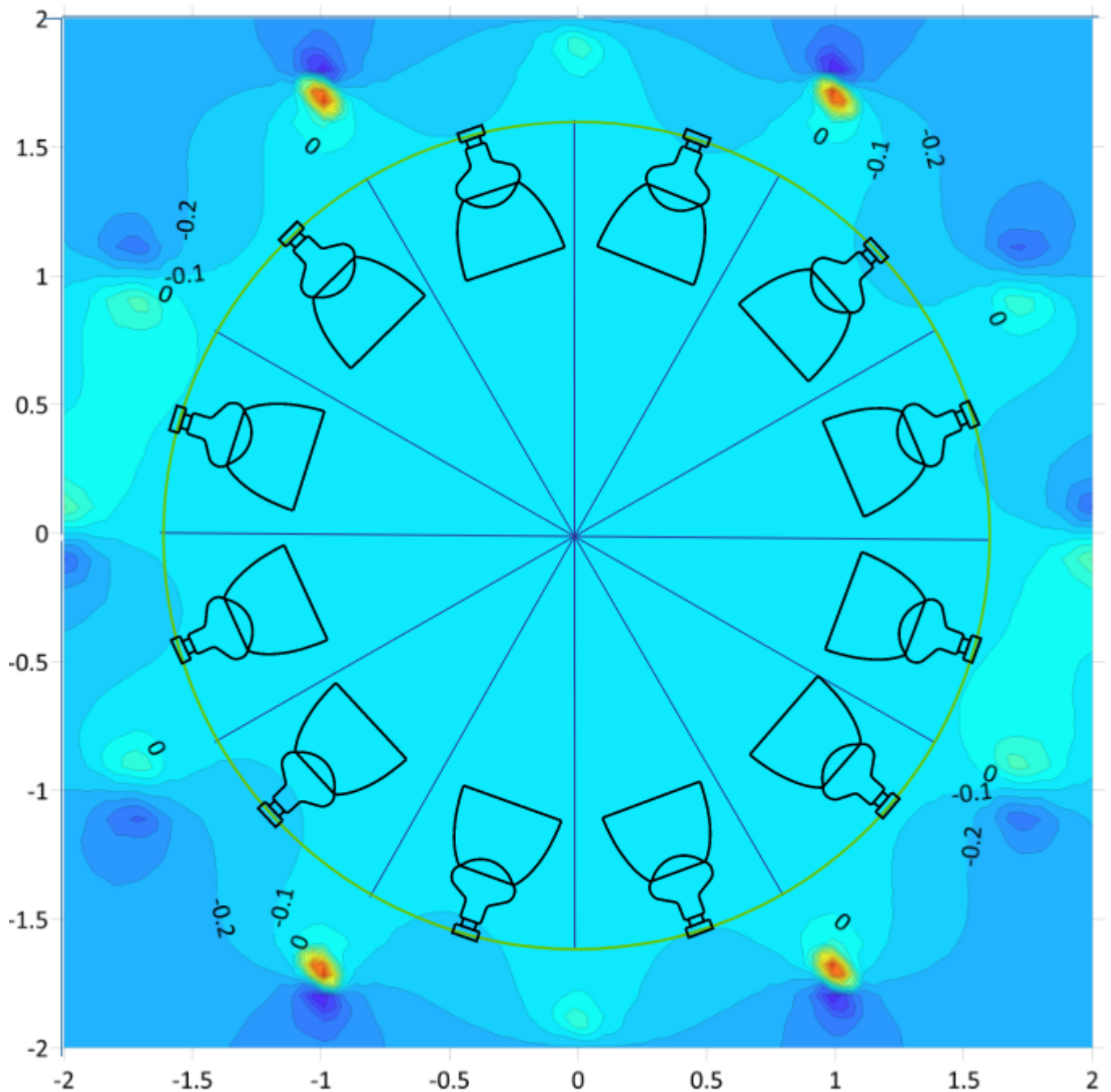


Рисунок 3.13 — Карта остаточного магнитного поля на высоте 2.4 м, в районе расположения 1 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара.

ное магнитное поле вертикальной компоненты при таком расположении колец составляет от 0.03 до 0.06 Гс.

$Z=3.5 \text{ M}$

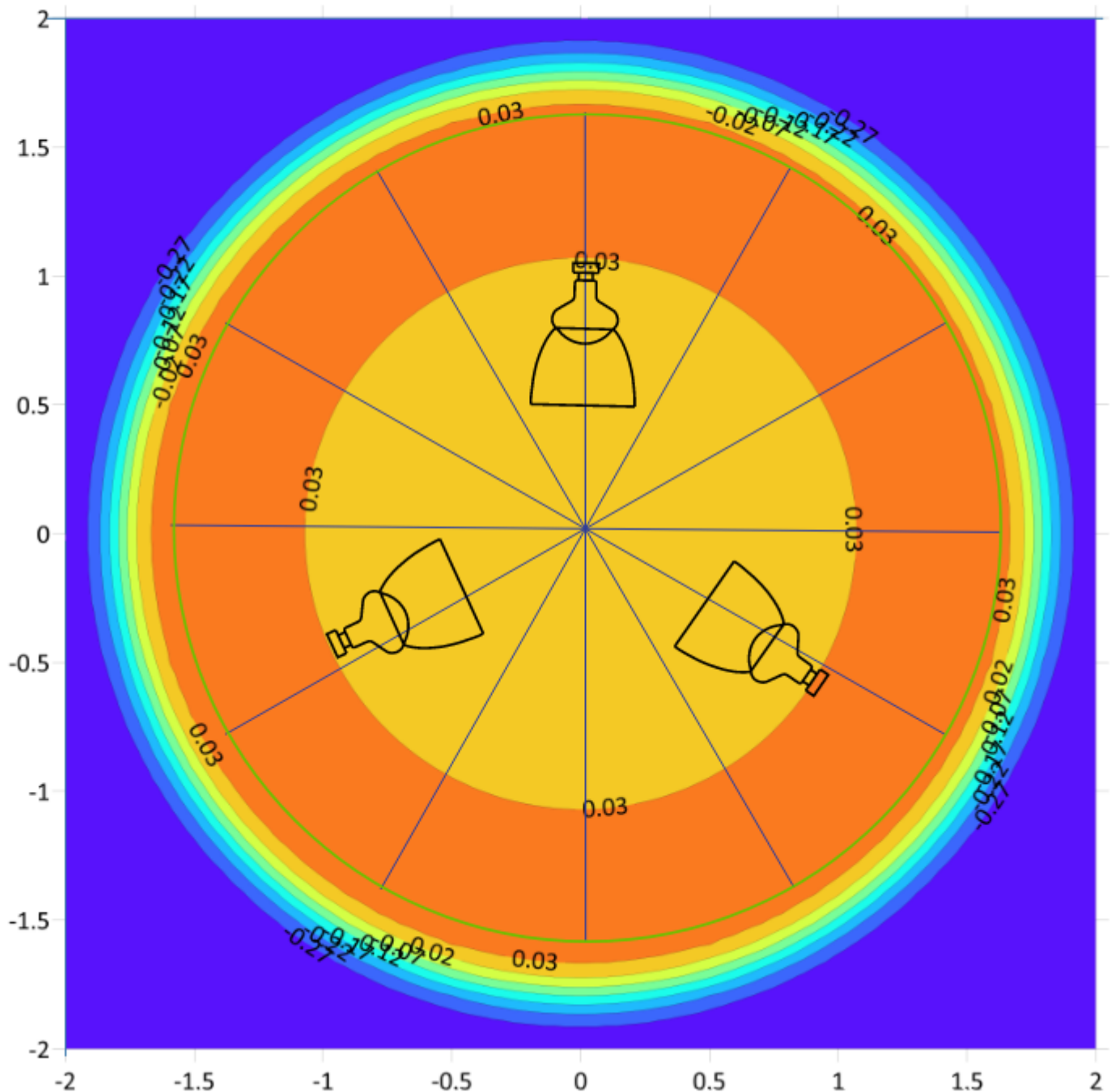


Рисунок 3.14 — Карта остаточного магнитного поля вертикальной компоненты на высоте 3.5 м, в районе расположения 3 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара.

Z=3 M

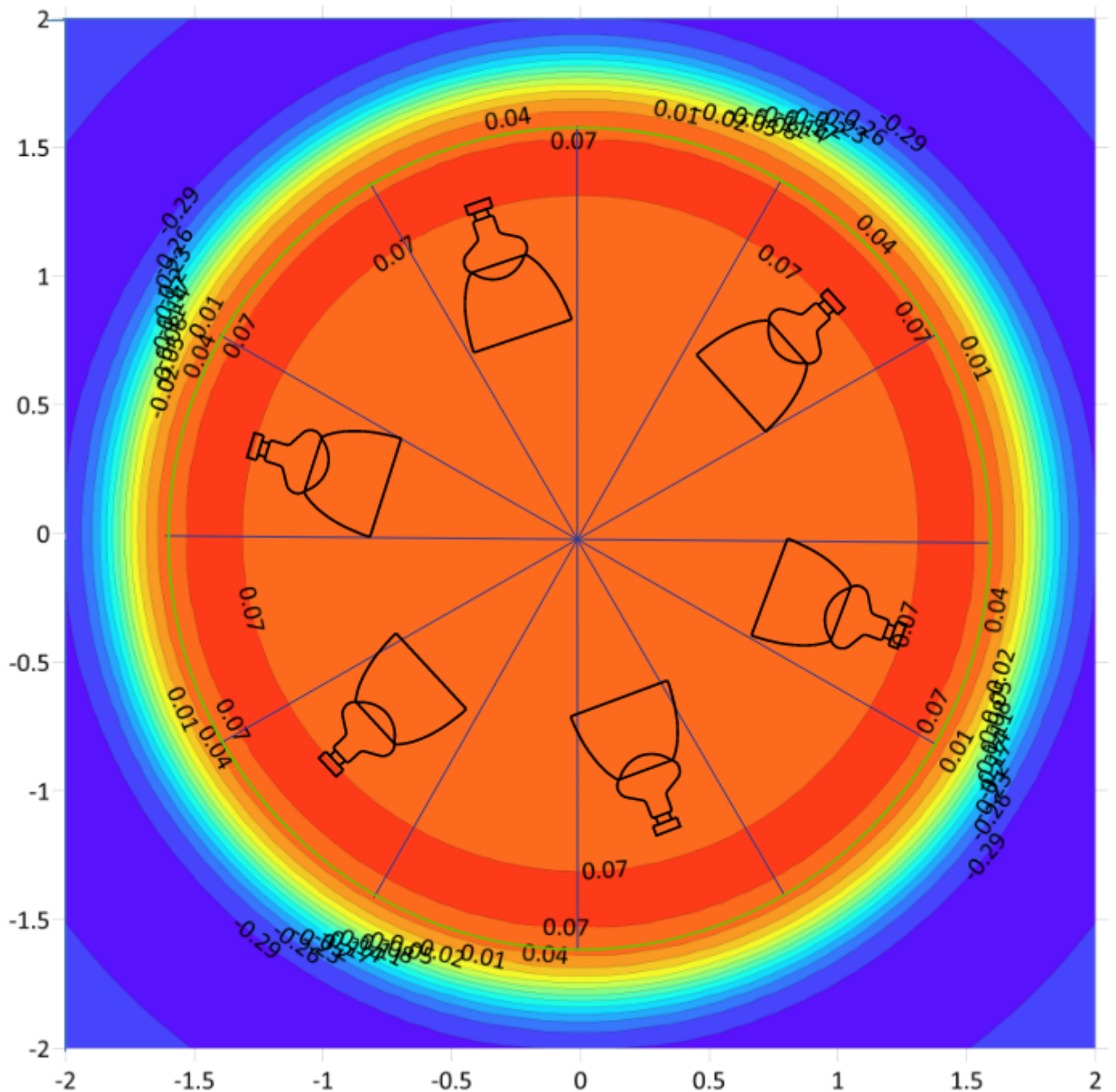


Рисунок 3.15 — Карта остаточного магнитного поля вертикальной компоненты на высоте 3 м, в районе расположения 2 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара.

Z=2.4 M

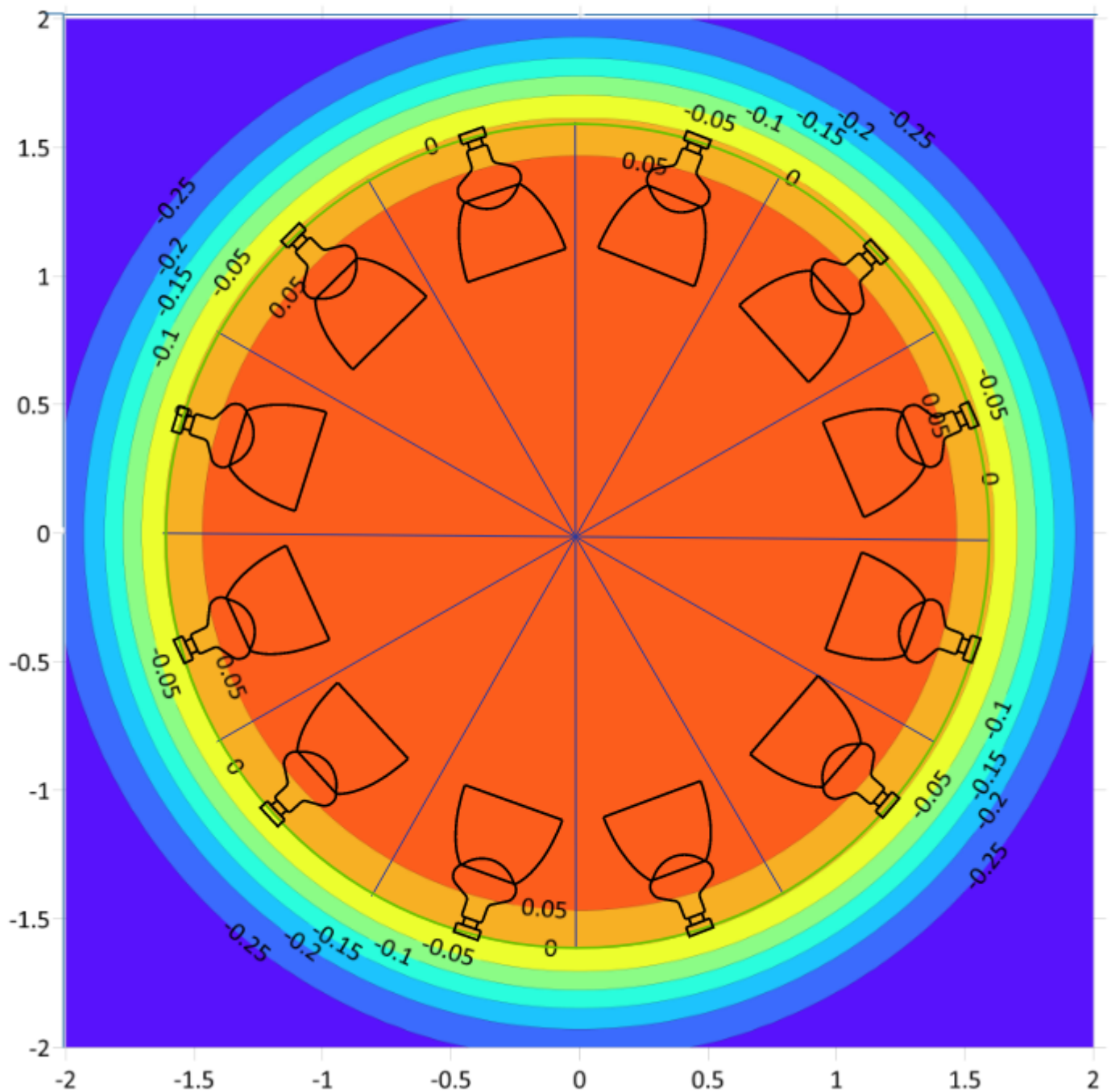


Рисунок 3.16 — Карта остаточного магнитного поля вертикальной компоненты на высоте 2.4 м, в районе расположения 1 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара.

По результатам расчетов для разных видов креплений были сделаны таблицы (3 — 5), в которых представлено остаточное магнитное поле для каждого ФЭУ для трех вариантов креплений.

-	ФЭУ	Горизонтальная компонента, Гс	Вертикальная компонента, Гс
Нижний ярус	1	-0.09	0
	2	-0.1	
	3	-0.05	
	4	0.12	
	5	-0.06	
	6	-0.1	
	7	-0.1	
	8	-0.1	
	9	-0.03	
	10	0.12	
	11	-0.04	
	12	-0.1	
Средний ярус	1	-0.05	0.08
	2	0.01	
	3	0	
	4	0	
	5	0.02	
	6	-0.01	
Верхний ярус	1	0.11	0.04
	2	0.02	
	3	0	

Таблица 3 — Остаточное магнитное поле в местах расположения ФЭУ при креплении катушек Гельмгольца на каркасе детектора

-	ФЭУ	Горизонтальная компонента, Гс	Вертикальная компонента, Гс
Нижний ярус	1	-0.06	0.05
	2	-0.06	
	3	-0.05	
	4	0.06	
	5	-0.03	
	6	-0.03	
	7	-0.05	
	8	-0.05	
	9	-0.03	
	10	0.05	
	11	-0.04	
	12	-0.045	
Средний ярус	1	-0.01	0.06
	2	0.03	
	3	0.04	
	4	0	
	5	0.02	
	6	0.02	
Верхний ярус	1	0.15	0.03
	2	0	
	3	0.04	

Таблица 4 — Остаточное магнитное поле в местах расположения ФЭУ при выносе катушек Гельмгольца на 20 см за каркас детектора

-	ФЭУ	Горизонтальная компонента, Гс	Вертикальная компонента, Гс
Нижний ярус	1	-0.08	0.06
	2	-0.09	
	3	-0.08	
	4	-0.02	
	5	-0.06	
	6	-0.07	
	7	-0.08	
	8	-0.1	
	9	-0.08	
	10	-0.02	
	11	-0.06	
	12	-0.08	
Средний ярус	1	-0.05	0.05
	2	-0.04	
	3	-0.04	
	4	-0.06	
	5	-0.04	
	6	-0.04	
Верхний ярус	1	0.02	0.01
	2	-0.03	
	3	-0.03	

Таблица 5 — Остаточное магнитное поле в местах расположения ФЭУ при креплении катушек Гельмгольца на стенках водного резервуара

3.4 Выбор электрического кабеля

Катушки Гельмгольца располагаются в водном резервуаре, соответственно, кабели должны быть защищены от попадания воды внутрь изоляции. Помимо этого, кабели должны иметь высокие прочностные характеристики во избежание повреждения проводников в процессе монтажа и эксплуатации. В условиях повышенной влажности для передачи электроэнергии используется специальное оборудование — водопогружные кабели. Эти кабели разработаны с учетом специфических требований среды, в которой они будут эксплуатироваться. Правильный выбор является критически важным для обеспечения безопасной и эффективной работы всех связанных электрических систем. Водопогружные кабели отличаются от обычных тем, что они имеют особую конструкцию и изоляцию, позволяющую предотвратить попадание влаги внутрь и защитить проводники от коррозии. Это особенно важно в таких областях, как насосные станции, системы орошения, подводное освещение и другие аналогичные приложения. Правильный выбор водопогружных кабелей - это ключевое условие для обеспечения надежной работы электрического оборудования в условиях, насыщенных влагой.

3.4.1 Электрический провод ВПП

В последние годы кабели марки ВПП зарекомендовали себя как надежное решение для использования в водной среде. Эти погружные провода находят широкое применение не только при подключении погружных насосов, но и при устройстве коммуникаций к фонтанам, источникам питьевой воды и другим устройствам, взаимодействующим с жидкостями. Как и другие типы водопогружных кабелей, изделия с маркировкой ВПП отличаются высокой устойчивостью к воздействию воды в течение длительного времени. Такой уровень надежности обеспечивается рядом конструктивных особенностей, о которых можно судить, в том числе, по расшифровке самой аббревиатуры «ВПП»: В - водопогружной тип кабеля; П - полиэтиленовая внутренняя изоляция; П - внешняя оболочка из полиэтилена.

Полиэтилен, используемый в конструкции провода, выполняет сразу две ключевые задачи. Во-первых, он изолирует токопроводящую жилу от попадания влаги. Во-вторых, обеспечивает защиту от механических повреждений. Благодаря своей высокой пластичности и устойчивости к разрывам, полиэтилен можно растягивать без риска повреждения – разорвать его крайне трудно. Среди ключевых особенностей кабелей марки ВПП следует отметить:

- Устойчивость к экстремальным температурам: кабель способен стабильно работать в диапазоне температур от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$
- Долговечность. Согласно технической документации, срок службы составляет не менее 6 лет, однако на практике он зачастую превышает указанный показатель, даже при интенсивной эксплуатации
- Высокая влагостойкость. Кабель сохраняет свои свойства при постоянном контакте с водой различной степени солености

3.4.2 Электрический кабель КВВ

Кабели марок КВВ (без защитной брони) и КВВБ (с броней) используются для подключения стационарного электрооборудования и устройств, рассчитанных на напряжение до 660 В переменного тока (с частотой до 400 Гц) или до 1000 В постоянного тока. Эти кабели можно укладывать как внутри зданий, так и снаружи - в том числе в кабельных каналах и открытом грунте, а также в зонах с повышенной опасностью взрыва и в местах, где возможно воздействие блуждающих токов. Кабели пригодны для использования в любых климатических условиях. При укладке следует учитывать минимальный радиус изгиба: он составляет не менее 10 внешних диаметров для бронированных кабелей и 6 диаметров - для небронированных.

Конструкция кабелей КВВ и КВВБ включает многопроволочные жилы не ниже 4-го класса, объединённые в общий пучок либо скрученные в пары, тройки или четвёрки. Сердечник кабеля дополнительно обёрнут водоограничивающей лентой, предотвращающей распространение влаги при повреждении внешней оболочки. В обычном исполнении кабели изготавливаются с изоляцией и оболочкой из ПВХ пластиката, с медными многожильными токопроводящими

элементами. Бронированные варианты оснащаются защитой из оцинкованной стальной проволоки либо из ленты.

3.4.3 Электрический кабель МСЭО

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, также известный как фторопласт-4Д) широко используется в кабельной промышленности как изоляционный материал для различных типов кабелей. Благодаря своим прочностным характеристикам и устойчивости к воздействию влаги, он находит применение в самых разных сферах – от внутриприборной и межприборной разводки до авиационной техники. Помимо этого, материал отличается низким уровнем собственной радиоактивности. Изоляция на основе ПТФЭ может выполняться двумя способами: с помощью обмотки строганными лентами (в этом случае изоляция не является герметичной) либо с применением сырых каландрованных лент, которые затем подвергаются термической обработке, образуя сплошной монолитный слой. Кабели серии МС предназначены для эксплуатации в цепях переменного тока с напряжением до 100, 250 или 500 В при частоте до 10 кГц, а также в цепях постоянного тока с номиналом до 150, 300 или 700 В в зависимости от конкретной модификации. Они могут поставляться как с экранированием, так и без него. Провода МС с медными жилами, покрытыми оловянно-свинцовым сплавом (например, МС 13-16), рассчитаны на работу в температурном диапазоне от -55°C до $+145^{\circ}\text{C}$. Варианты с посеребрёнными жилами (МС 23-16) могут использоваться при температурах от -60°C до $+200^{\circ}\text{C}$. Экранирующий слой обеспечивает дополнительную защиту от внешних электромагнитных помех, что делает такие кабели подходящими для передачи как цифровых, так и аналоговых сигналов. Кабели МС подходят для эксплуатации в промышленности и на производственных объектах. Благодаря своей прочности и устойчивости к внешним воздействиям (механическим, температурным, влажностным и пр.), они могут использоваться даже в экстремальных условиях, таких как добывающая промышленность, а также в составе оборудования и транспорта - поездов, самолетов, судов и т.д.

По результатам анализа различных кабельных марок для конкретного применения был выбран кабель ВПП. Он соответствует всем предъявленным

требованиям: устойчив к влаге, прочен, а также выпускается в одножильном исполнении, чего не было у некоторых альтернатив. При сечении $2,5 \text{ мм}^2$ и с учетом норм ПУЭ, допустимый ток для медного одножильного провода составляет 37 А. Подробный расчет тепловой нагрузки на проводники системы компенсации 5-тонного прототипа будет рассмотрен в следующей главе.

3.5 Расчет тепловыделения проводников

Одним из ограничивающих критериев использования активного метода компенсации является тепловыделение катушек Гельмгольца, которое будет уходить на нагрев окружающей среды. Поэтому необходимо определить общий тепловой поток, при котором наступает равновесие системы проводник-среда и дальнейшего нагрева окружающей среды не происходит. После определения равновесного теплового потока можно определить максимальный допустимый ток для системы компенсации магнитного поля, при котором не будет происходить нежелательного нагрева окружающей среды, влияющего на характеристики фотоумножителей. Тепломассообмен – это наука о самопроизвольных необратимых процессах распространения теплоты в переменном поле температур и о самопроизвольных необратимых процессах распространения массы и переменном поле концентраций [104]. В движущихся жидкостях и газах происходит конвективный теплообмен, распространение теплоты при котором происходит за счет перемещения макрочастиц жидкости и газа, а также путем теплового движения микрочастиц. Движение называют вынужденным, если оно происходит под действием внешних сил, например за счет перепада давления. Свободным же называется движение, обусловленное действием неоднородного поля массовых сил, например более нагретые частицы среды поднимаются вверх, а менее нагретые опускаются вниз [105]. Для расчета нагрева проводников в системе компенсации магнитного поля рассматривается вынужденное движение, так как в строении 5-тонного прототипа предусмотрена система циркуляции воды, которая обеспечивает постоянный приток новой ультрачистой воды. Данный момент необходимо учитывать, потому что он влияет на теплообмен между проводниками и средой. В зависимости от интенсивности движения жидкости выделяют ламинарный, переходный и турбулентный режи-

мы течения. При ламинарном течении частицы среды движутся по плавным, непересекающимся траекториям. Функции температуры, скорости и давления являются гладкими функциями координат и времени. Перенос субстанции происходит за счет движения микрочастиц среды. При турбулентном режиме движения частицы жидкости движутся по сложным, пересекающимся траекториям, параметры течения являются пульсирующими функциями координат и времени. Перенос субстанции осуществляется за счет взаимодействия макрообъемов среды, так называемых турбулентных молей. Режим течения флюида определяется по значению критерия Рейнольдса, который при вынужденном движении рассчитывается по формуле:

$$Re = \frac{wl}{\nu},$$

где w - скорость течения, м/с; l - определяющий размер, м; ν - кинематический коэффициент вязкости, м²/с. При продольном обтекании среды за определяющий размер принимается длина поверхности теплообмена, при поперечном - диаметр цилиндра или толщина стенки. Физический смысл данного критерия состоит в оценке отношения силы инерции к силе трения. В зависимости от режима течения флюида, а также от направления его течения (продольное или поперечное), рассчитывается критерий Нуссельта, который характеризует отношение двух форм математического описания теплового потока, которым обмениваются жидкость и нагреваемая поверхность. В случае ламинарного режима течения критерий Нуссельта рассчитывается по формуле:

$$Nu = 0.664Re^{0.5}Pr^{0.333},$$

где Pr - критерий Прандтля, который представляет собой отношение двух характеристик молекулярного переноса импульса и теплоты. Данный критерий представляет собой физический параметр среды и его значения для конкретного вещества приводятся в справочниках. Для турбулентного режима критерий Нуссельта определяется по формуле:

$$Nu = 0.037Re^{0.8}Pr^{0.43},$$

Следующим шагом является расчет коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{l},$$

где λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м*К, который характеризует способность тела (вещества) проводить теплоту; l - определяющий размер, м. Коэффициент теплоотдачи не имеет физического смысла, а представляет собой коэффициент пропорциональности в законе теплоотдачи Ньютона. Для определения общего теплового потока между телом и обтекающей его средой используется формула:

$$Q = q_c F,$$

где q_c - поверхностная плотность теплового потока, Вт/м²; F - площадь поверхности теплообмена, м². Тепловой поток характеризует интенсивность теплового обмена во времени. Для расчета плотности теплового потока используется формула:

$$q_c = \alpha(t_c - t_{ж}),$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²*К); t_c - температура на поверхности тела, °С; $t_{ж}$ - температура жидкости, °С.

Для расчета максимальной допустимой силы тока в проводнике взят случай продольного обтекания кабеля водой. Скорость течения жидкости, w , составляет 0.1 м/с, при такой скорости течения расход воды, G , через сечение диаметром 10 см составит 2800 л/ч. Общая длина проводника, L , в данном случае составляет 102.2 метра. Используя формулу 22, значение критерия Рейнольдса, Re , составило 10.15×10^6 , что соответствует турбулентному режиму течения флюида. В этом случае для расчета критерия Нуссельта, Nu , используется формула 33, значение критерия Прандтля, Pr , для воды при температуре 20°С составляет 7.03. Значение критерия Нуссельта составляет 34433. Коэффициент теплоотдачи, α , равняется 201 Вт/(м²*К). При расчете максимальной силы тока разность температур поверхности кабеля и окружающей среды составляет 0,5°С. Таким образом, значение плотности теплового потока составляет 100,5 Вт/м². Теплота, которая будет выделяться в проводнике в результате протекания тока рассчитывается по формуле:

$$Q = I^2 R,$$

где I - сила тока в проводнике, А; R - сопротивление проводника, Ом. При наступлении теплового равновесия тепловой поток, выделяемый при протекании тока, будет равен тепловому потоку, уносимому с поверхности кабеля:

$$I^2 R = q_c F$$

Таким образом, после преобразования верхнего равенства максимальная допустимая сила тока рассчитывается по формуле:

$$I = \sqrt{\frac{q_c F}{R}}$$

При разности температур $0,5^\circ\text{C}$ максимальная сила тока составляет 8.03 А. Рабочая сила тока в системе компенсации магнитного поля составляет 3.5 А, что более чем в два раза ниже максимально допустимой, таким образом, система компенсации в рабочем режиме не вызывает нагрева окружающей среды более чем на $0,5^\circ\text{C}$, что в свою очередь, не будет влиять на параметры фотоумножителей.

3.6 Монтаж системы компенсации магнитного поля

Каркас системы компенсации магнитного поля выполнен на основе полипропиленовых труб, внутри которых проложены кабели системы. Конструкция состоит из двух основных элементов:

- Шесть прямоугольных рам, расположенных в вертикальных плоскостях, содержащих катушки для компенсации горизонтальной компоненты магнитного поля. Каждая рамка имеет размеры 4 м по высоте и 4 м по ширине и образована двумя вертикальными и двумя горизонтальными трубами, соединенными в углах.
- Горизонтальные кольца, предназначенные для компенсации вертикальной компоненты магнитного поля, выполнены в виде окружностей радиусом 2 м и расположены в горизонтальной плоскости.

Горизонтальные кольца крепятся к вертикальным с помощью полипропиленовых крестовин, формируя единый каркас системы компенсации. Кабель

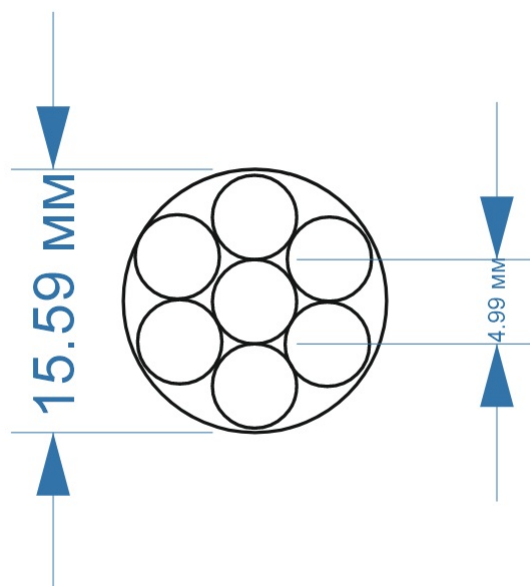


Рисунок 3.17 — Схема укладки 7 витков в трубе.

сечением 2.5 мм^2 в изоляции имеет диаметр 5 мм. Для укладки 7 витков требуется труба с внутренним диаметром не менее 16 мм, а для 10 витков – около 20 мм. На рисунках 3.17 и 3.18 представлены варианты укладки кабелей для горизонтальных и вертикальных колец соответственно. Для реализации конструкции используется полипропиленовая труба класса PN10 с наружным диаметром 32 мм и толщиной стенки 3 мм, что обеспечивает внутренний диаметр 26 мм. Это позволяет свободно размещать кабели как в вертикальных, так и в горизонтальных кольцах.

Горизонтальные трубы, в которых размещаются кольца для компенсации вертикальной компоненты магнитного поля, разделены на 12 сегментов в местах стыков с вертикальными трубами. Длина каждого сегмента составляет 0.94 м. Для упрощения прокладки кабелей в этих местах предусмотрены технологические отверстия, обеспечивающие доступ к внутреннему пространству труб. Вертикальные трубы также сегментированы в точках соединения, при этом длина каждого вертикального участка составляет 1 м, что соответствует расстоянию между горизонтальными кольцами. Питание горизонтальных колец осуществляется от одного источника MAISHENG MP1505D, способного выдавать ток до 5 А. Это позволяет укладывать кабель горизонтальных колец одной длиной без необходимости деления на секции. Для питания вертикальных колец используются три блока питания MAISHENG MS3010D-MS002, каждый из которых обеспечивает до 10 А при напряжении до 30 В. Поэтому монтаж вер-

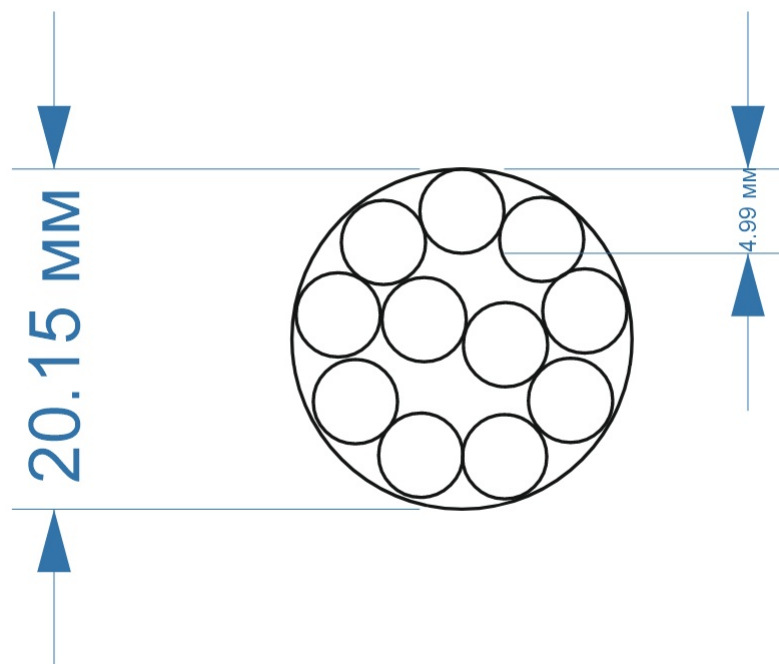


Рисунок 3.18 — Схема укладки 10 витков в трубе.

тикальный колец осуществляется попарно с углом между секциями 30° , при данном способе монтажа угол сгиба кабеля составляет 150° .

3.7 Заключение к главе 3

В данной главе рассмотрены конструктивные особенности первого и второго прототипов детектора с массами мишени 0.5 и 5 тонн соответственно. Проведен анализ магнитного поля в зоне установки прототипа с учетом влияния металлической экранировки зала и магнитных свойств окружающих пород. На основании экспериментальных измерений показано существенное отличие локальных компонент магнитного поля от расчетных значений по модели IGRF-13, что обусловило необходимость разработки активной системы магнитной компенсации. Были рассмотрены 3 конфигурации колец Гельмгольца, отличающихся расположением проводников относительно строения детектора. При выборе итоговой компоновки системы компенсации магнитного поля помимо минимального остаточного поля необходимо также учитывать сложность монтажа всей системы. По результатам анализа была выбрана конфигурация, при которой катушки Гельмгольца расположены на стенках водного резервуара.

По результатам расчетов такое расположение колец Гельмгольца обеспечивает снижение горизонтальной компоненты магнитного поля до 0.08 Гс для 40 ФЭУ и 0.1 Гс для двух фотоумножителей. Остаточное поле вертикальной компоненты варьируется от 0.03 до 0.06 Гс. Отдельное внимание уделено оценке тепловых эффектов, связанных с работой системы компенсации. На основе анализа процессов вынужденного конвективного теплообмена в условиях циркуляции ультрачистой воды рассчитан максимальный допустимый ток в проводниках системы. Показано, что при рабочем токе 3.5 А тепловыделение катушек более чем в два раза ниже предельно допустимого значения, соответствующего нагреву среды не более чем на 0,5°C. Таким образом, функционирование системы магнитной компенсации не приводит к нежелательному изменению температурного режима и не оказывает влияния на характеристики фотоумножителей. Результаты опубликованы в работах:[П.1, П.2, П.4, П.8].

Глава 4. Разработка систем и методик очистки жидкого сцинтиллятора для прототипа ББНТ с массой мишени 5 тонн

4.1 Линейный алкилбензол как основа жидкого сцинтиллятора и требования к его чистоте

Одним из важнейших условий успешного эксперимента является выбор, свойства и качество жидкого сцинтиллятора, играющего роль мишени. В этом случае очистка жидкого сцинтиллятора является одной из главных задач, которая имеет решающее значение для достижения оптических свойств и радиоактивной чистоты. Если радиоактивные изотопы присутствуют в составе сцинтилляционной смеси, сигналы этих изотопов будут накладываться на реальный сигнал нейтрино. В это время примеси, нарушающие оптические свойства, понизят длину ослабления света и повлияют на распространение и обнаружение света, а, следовательно, и на общее энергетическое разрешение.

В настоящее время линейный алкилбензол (ЛАБ) является одним из наиболее популярных растворителей для приготовления жидких органических сцинтилляторов [106—112]. По сравнению с растворителями, применявшимися ранее, ЛАБ обладает рядом значительных преимуществ: высокой температурой вспышки, большой длиной ослабления света, хорошим световыходом (около 75% от световыхода стандартного раствора на основе псевдокумола), совместимостью с различными конструкционными материалами, включая полиметилметакрилат (акрил), а также высокой экологической безопасностью – уровень биоразлагаемости составляет около 95% [113]. Кроме того, ЛАБ производится в больших объемах во многих странах, так как используется в качестве основы для изготовления жидких моющих средств. Это позволяет использовать ЛАБ местного производства при создании сцинтилляторов, что может существенно упростить логистику и снизить затраты. Промышленное производство линейного алкилбензола представляет собой многостадийный процесс, основанный на использовании линейных парафинов в качестве основного сырья. Из этих парафинов получают линейные моноолефины, которые затем применяются для алкилирования бензола. Качество ЛАБ зависит как от свойств исходного сырья, так и от соблюдения технологических условий на всех этапах синтеза. Из-

за возможных различий в составе и качестве продукта, обязательно требуется предварительное исследование характеристик используемого ЛАБ. Основные свойства ЛАБ приведены в таблице 6. В России единственным производителем линейного алкилбензола является ООО «Кинеф», расположенный в г. Кириши. В таблице 7 представлены составы сцинтилляторов, используемые в других экспериментах.

Формула	$C_{10-15}H_{21-31}$
Плотность, кг/м ³	863
Молекулярная масса, г/моль	239-243
Показатель преломления	1.484
Температура вспышки, °C	143

Таблица 6 — Основные свойства ЛАБ

Эксперимент	Растворитель	Добавки	Длина ослабления, м
Daya Bay	ЛАБ	1 г/л Gd, 3 г/л PPO	14 ± 4
Borexino	Псевдокумол	1.45 г/л PPO	10
KamLAND	80% додекан, 20% псевдокумол	1.36 г/л PPO	12.7 ± 0.4
Double Chooz	80% н-додекан, 20% о-РХЕ	4.5 г/л Gd — (thd) ³ , 0.5% масс. Oxolane, 7 г/л PPO, 20 мг/л bis- MSB	7.8 ± 0.5
RENO	ЛАБ	3 г/л PPO, 30 мг/л bis-MSB, 1 г/л Gd	>10
JUNO	ЛАБ	2 г/л PPO, 3 мг/л bis- MSB	>20

Таблица 7 — Состав жидкого сцинтиллятора в других экспериментах и его длина ослабления света

Оптические свойства ЛАБ во многом зависят исходного сырья, методов производства и условий транспортировки. В зависимости от этого длина ослабления света исходного продукта варьируется от 1 до 15 м. Помимо технологических условий на оптические свойства оказывают влияние механические примеси, органические загрязнения и их продукты окисления, которые образуются при контакте с воздухом. Основным методом удаления механических

примесей является пропускание ЛАБ через тонкие механические фильтры с размерами пор до 1 мкм. Хроматографическая очистка на колонках, заполненных оксидом алюминия и вакуумная дистилляция, хорошо себя зарекомендовали в качестве методов удаления органических загрязнений. Радиоактивные примеси могут быть разделены на две группы по способу их удаления из сцинтиллятора. Тяжелые примеси, такие как ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K , могут быть удалены с помощью вакуумной дистилляции и водной экстракции [55; 56]. Более летучие примеси, такие как ^{222}Rn , ^{39}Ar и ^{85}Kr , удаляются путем барботирования азотом или гелием. Основные радиоактивные загрязнения, их источники и концентрация представлены в таблице 8.

Изотоп	Источник	Концентрация	Метод удаления
^{238}U	Пыль, растворенная в жидкости	10^{-6} г/г	Дистилляция, водная экстракция
^{232}Th	Пыль, растворенная в жидкости	10^{-5} г/г	
^{40}K	РРО	10^{-6} г/г	
^{222}Rn	Воздух	<100 Бк/м ³	Барботирование азотом или гелием
^{39}Ar , ^{42}Ar	Воздух	1 Бк/м ³	
^{85}Kr	Воздух	1 Бк/м ³	

Таблица 8 — Радиоактивные элементы, присутствующие в жидком сцинтилляторе, их источники и типичные концентрации, а также методы их удаления

В качестве сцинтилляционной смеси для прототипа ББНТ используется классическая смесь на основе линейного алкилбензола. В качестве сцинтилляционной добавки используется 2.5 дефинилоксазол (РРО) в концентрации 2 г/л. Оргстекло, из которого выполнена сфера, поглощает свет до 400 нм в то время, как максимум спектра излучения РРО приходится на область 350-380 нм. Поэтому для смещения спектра высвечивания сцинтиллятора был добавлен bis-MSB в концентрации 10 мг/л. Спектр пропускания оргстекла, спектры излучения РРО и bis-MSB показаны на рисунке 4.1 слева, справа приведено сравнение спектров высвечивания РРО и bis-MSB с квантовой эффективностью ФЭУ. Сцинтилляционная смесь содержится в сфере, выполненной из акрила,

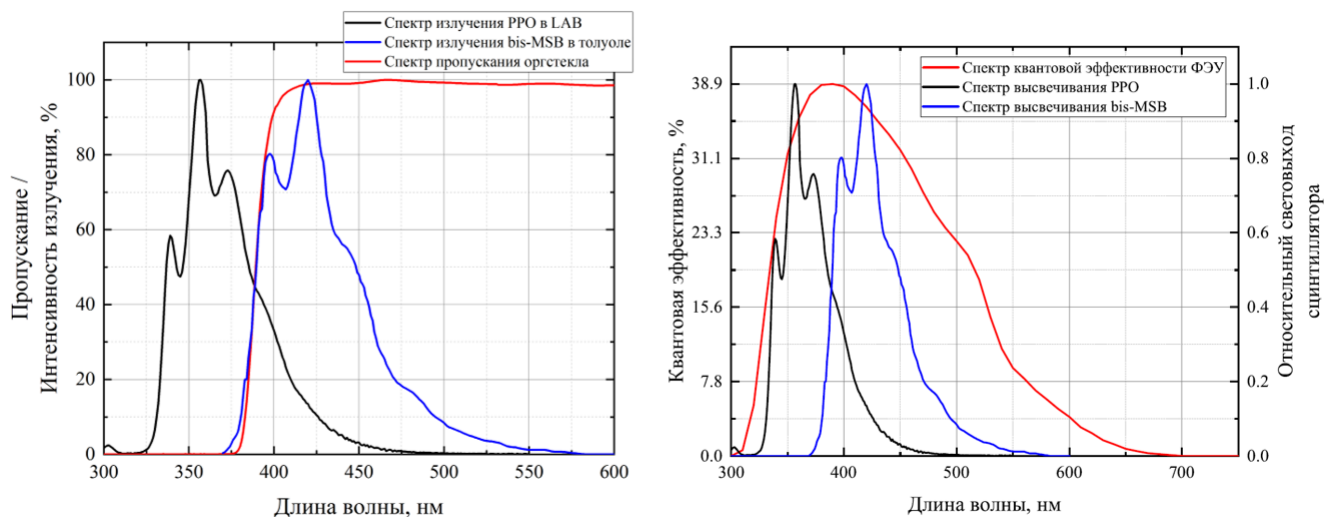


Рисунок 4.1 — Спектры излучения PPO и bis-MSB в ЛАБ, сравнение со спектром пропускания оргстекла (слева). Сравнение спектра квантовой эффективности ФЭУ со спектрами излучения PPO и bis-MSB (справа).

прозрачного материала с показателем преломления близким к показателю преломления ЛАБ.

4.2 Установка вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции

Вакуумная дистилляция - это метод разделения жидких смесей на компоненты с использованием пониженного давления. В результате понижения давления снижается температура кипения, что позволяет дистиллировать термочувствительные вещества или вещества с высокими температурами кипения без их разложения. Используя различия в температурах кипения различных фракций, смесь нагревают до тех пор, пока не начнётся избирательное кипение и последующая конденсация нужного компонента. Низколетучие компоненты концентрируются в нижней части системы, а высоколетучие – в верхней. Таким образом, летучие элементы концентрируются в большей степени в паровой фазе, тогда как менее летучие остаются в жидкости.

Строго говоря, следует различать процессы дистилляции и ректификации. При дистилляции молекулы, испаряющиеся с поверхности жидкости, движутся в одном направлении до тех пор, пока не достигнут зоны конденсации. Ректификация же отличается тем, что в ней жидкость, обычно в виде скон-

денсированного пара (флегмы), движется навстречу восходящему потоку пара. В отличие от дистилляции, которая включает только испарение и последующее конденсирование, в ректификации из-за тесного взаимодействия двух фаз (жидкости и пара) дополнительно происходят процессы тепло- и массообмена. При установившемся режиме ректификационной колонны состав пара и жидкости на каждой тарелке постепенно стремится к равновесию под действием разности температур и концентраций. Однако из-за встречного движения фаз – пара вверх и жидкости вниз – это равновесие постоянно нарушается, способствуя дальнейшему обогащению пара более летучими компонентами. Иными словами, флегма, опускаясь от верхней части колонны с более низкой температурой к нижней, где температура выше, поглощает из пара компоненты с высокой температурой кипения и отдает ему более летучие вещества. Поскольку тепло- и массообмен происходят на границе раздела фаз, для эффективной работы колонны важно обеспечить как можно большую площадь соприкосновения между жидкостью и паром. Как правило, компоненты жидкой смеси, температура кипения которых различаются более, чем на 50°C , можно разделить простой дистилляцией, в то время, как ректификацией можно разделять компоненты, температуры кипения которых отличаются менее, чем на $0,5^{\circ}\text{C}$. А при наличии большого количества тарелок можно разделить и компоненты, у которых температуры различаются менее, чем на $0,05^{\circ}\text{C}$. Однако, для простоты далее по тексту термин дистилляция будет применяться к обоим процессам. Подробное описание процесса и основных положений вакуумной дистилляции приведены в работах [114–116].

4.2.1 Разработка методики очистки методом вакуумной дистилляции

Разработка методики вакуумной дистилляции производилась в лабораторных условиях с помощью роторного испарителя Heidolph. На рисунке 4.2 показана принципиальная схема и фото устройства. Роторный испаритель состоит из колбы, в которую помещается исходное вещество. Колба вращается с помощью двигателя в нагревательной ванне, наполненной теплоносителем. В качестве теплоносителя использовалось силиконовое масло ПМС-20. По мере



Рисунок 4.2 — Устройство роторного испарителя Heidolph.

нагрева растворителя, его пары перемещаются в холодильник, где конденсируются. Чистый сконденсированный растворитель поступает в приемную колбу, после чего отбираются пробы для анализа качества очистки. Для создания пониженного давления использовался вакуумный насос MZ 1C производителя Vacuubrand, который посредством фторопластового шланга соединялся с вакуумным краном испарителя.

Для отработки методики очистки методом вакуумной дистилляции использовался линейный алкилбензол, который непосредственно будет использоваться в прототипе детектора. ЛАБ производства ООО «Кинеф». Температурное разложение линейного алкилбензола наступает при температуре около 200°C . Поэтому масло ПМС-20, которое использовалось в качестве теплоносителя, нагревалось до температуры 180°C . Колба вращалась с частотой 50 оборотов в минуту. Объем исходного растворителя составлял 350 мл, ЛАБ отбирался каждые 50 мл по мере его поступления в приемную колбу. В результате очистки были отобраны 6 проб очищенного ЛАБ, 1 проба концентрата, оставшегося в исходной колбе, а также одну пробу исходного ЛАБ. Поглощение всех образцов было измерено с помощью спектрофотометра Perkin Elmer Lambda 35. При измерении поглощения использовались две кюветы - 2 и 10 см. Обе кюветы заполнялись одним и тем же ЛАБ. Кювета длиной 2 см представляла собой кювету сравнения, с которой сравнивался образец в кювете длиной 10 см. Спектры поглощения приведены на рисунке 4.3.

Как видно из спектров поглощения, линейный алкилбензол имеет три характерных пика в диапазоне длин волн между 350 и 400 нм. Эти пики, которые

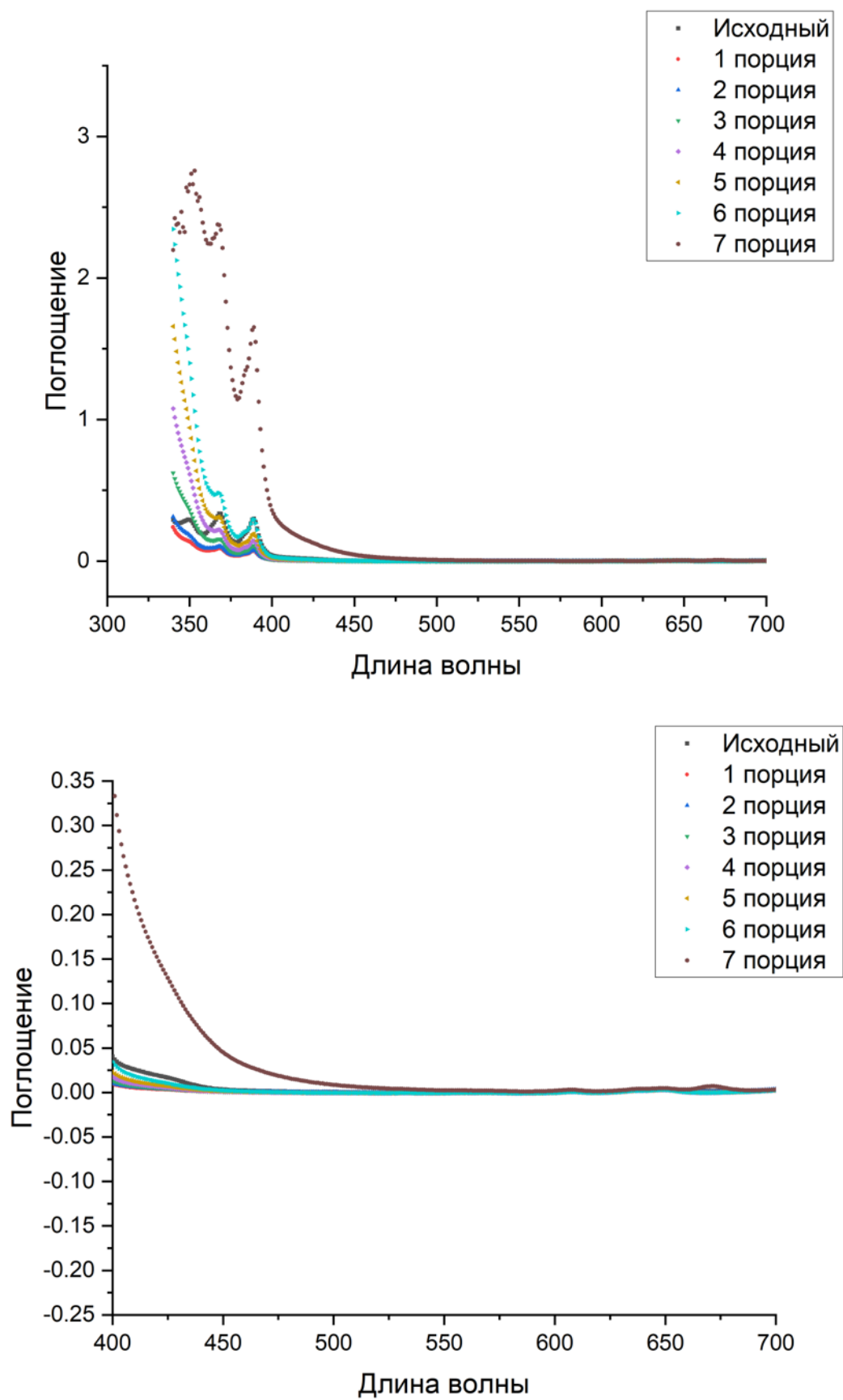


Рисунок 4.3 — Спектры поглощения образцов ЛАБ после очистки и исходного образца.

присутствуют только в ЛАБ российского производства, принадлежат 9-метилантрацену. Это вещество практически отсутствует в первых порциях ЛАБ после вакуумной дистилляции. Но 9-метилантрацен влияет на спектр поглощения и, соответственно, на длину ослабления света в той области спектра, которую не пропускает акрил. Поэтому эти пики не оказывают влияния на интересующую нас область. После получения спектров поглощения была рассчитана длина ослабления света для длин волн 420, 430, 440 нм. Выбор длин волн для расчета длины ослабления обусловлен квантовой эффективностью ФЭУ, а также спектром пропускания оргстекла, из которого выполнена центральная зона детектора. Расчет длин ослабления проводился по формуле:

$$L_n = \frac{l_{cuv}}{2.3 \times A},$$

где l_{cuv} - разница длин кюветы образца и кюветы сравнения, м; A_n - значение поглощения при определенной длине волны. Данные поглощения, длины ослабления света при длинах волн 420, 430, 440 нм приведены в таблице 9.

Образец	A_{420}	A_{430}	A_{440}	L_{420}	L_{430}	L_{440}
Исходный	0.0195	0.0134	0.0066	1.78	2.59	5.27
50 мл	0.0038	0.0026	0.0014	9.15	13.38	24.8
50-100 мл	0.0043	0.0031	0.0018	8.09	11.22	19.32
100-150 мл	0.0053	0.0035	0.0018	6.56	9.94	19.32
150-200 мл	0.0065	0.0041	0.0019	5.35	8.48	18.3
200-250 мл	0.0085	0.0054	0.0028	4.09	6.44	12.42
250-300 мл	0.0126	0.008	0.0043	2.76	4.35	8.09
Концентрат	0.1525	0.106	0.0698	0.23	0.33	0.49

Таблица 9 — Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после вакуумной дистилляции

Как видно из результатов измерений, вакуумная дистилляция позволяет достичь хорошей степени очистки, особенно в первых порциях. При этом последние порции растворителя также имеют длину ослабления большую, чем исходный образец. Так как диаметр сферы, содержащей сцинтиллятор, составляет 2 м, то степень очистки даже последнего объема удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сцинтиллятору. Но так как разрабатываемая

методика очистки будет перенесена на полномасштабный детектор, на полноценной установке вакуумной дистилляции также будет отрабатываться методика для получения максимальной длины ослабления света.

4.2.2 Установка вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции

Схема развязки и принципиальная технологическая схема установки вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции показаны на рисунке 4.4 и 4.5 соответственно. Система очистки состоит из 7 основных блоков:

1. Емкость исходного раствора V-01 - вертикальная цилиндрическая емкость объемом 0.2 м^3 . Материал - нержавеющая сталь AISI 316. Рабочая среда - загрязненный линейный алкилбензол. Рабочее давление - 1.03 бар абс.
2. Сборник конденсата V-02 - вертикальная цилиндрическая емкость объемом 0.05 м^3 . Материал - нержавеющая сталь AISI 316. Рабочее давление - 0.005 бар абс. Рабочая среда - очищенный ЛАБ. Емкость оснащена двухрядным змеевиком для охлаждения очищенного линейного алкилбензола. Площадь поверхности змеевика - 1 м^2 . Рабочая среда змеевика - проточная вода. Температура рабочей среды змеевика - 10°C .
3. Емкость концентрата V-03. Материал - нержавеющая сталь AISI 316. Объем - 0.07 м^3 . Рабочая среда - концентрированная смесь отходов с ЛАБ. Рабочая температура - 65°C .
4. Вакуум-выпарная колонна с падающей пленкой VC-01. Тепловая мощность теплообменника - 17.35 кВт. Площадь теплообменника - 6.4 м^2 . Рабочее давление - 0.005 бар абс. Температура нагрева ЛАБ - 186°C . Греющая среда - термомасло АМТ-300. Температура греющей среды - 200°C . Давление греющей среды - 2 бар абс. Диаметр колонны - 500 мм, высота греющих труб - 1 м.
5. Промывная колонна с конденсатором паров VS-01. Рабочая среда - линейный алкилбензол. Количество флегмы - 5 кг/ч. Температура среды - 187°C . Давление среды - 0.005 бар абс. Диаметр колонны - 220 мм. Высота насадочной колонны - 450 мм. Тип насадки - регулярная. Площадь поверхности теплообмена - 0.7 м^2 . Греющая среда - пары ЛАБ/ЛАБ.

Температура греющей среды - 186°C. Нагреваемая среда - проточная вода. Температура нагреваемой среды - 16-22°C. Давление среды - 4 бар абс.

6. Термомасляный котел ТОВ-01. Тепловая мощность - 21 кВт. Среда - термомасло АМТ-300. Температура среды - 200°C. Давление среды - 2 бар абс.
7. Теплообменник типа «труба в трубе» Е-02. Тепловая нагрузка - 0.551 кВт. Площадь поверхности теплообмена - 0.07 м². Греющая среда - пары линейного алкилбензола. Давление среды - 0.005 бар абс. Нагреваемая среда - проточная вода. Температура нагреваемой среды - 10,3°C. Давление среды - 4 бар абс.

Исходный раствор ЛАБ подается насосом в емкость V-01. Из емкости V-01 загрязненный ЛАБ насосом подается на распределительное устройство пленочного испарителя VC-01. Контроль количества раствора, подаваемого в пленочный испаритель выпарного аппарата, ведут по месту при помощи ротаметров. Загрязненный линейный алкилбензол с помощью распределительного устройства направляется в трубное пространство, где нагревается с комнатной температуры до 186,3°C. ЛАБ в виде пленки, стекает по стенкам трубок испарителя VC-01. В результате нагрева из нее испаряется растворитель, который в виде пара вытесняется в центральную часть трубки и в ламинарном режиме движется параллельно стекающей жидкости. При достижении нижней кромки трубки концентрат проваливается в кубовую часть выпарной колонны. Паровая фаза так же попадает в куб колонны, где за счет расширения скорость паров резко снижается и из газовой фазы выпадают мелкодисперсные, капли жидкой фазы. Вторичные пары направляются в насадочную колонну VS-01, орошаемую очищенным конденсатом. Контроль температуры в выпарной колонне VC-01 осуществляется по месту с помощью термометра TG-1001. Уровень в кубе выпарной колонны VC-01 контролируется датчиком LS-4002 в автоматическом режиме.

Очищенный пар линейного алкилбензола с температурой 186,3°C, конденсируется в насадочной колонне VS-01. Конденсация паров происходит за счет протока воды через змеевик, установленный в верхней части насадочной колонны VS-01. Газоконденсатная смесь самотеком направляется в фазовый делитель – сборник конденсата V-02 на охлаждение. Емкость укомплектована двухрядным змеевиком, при протоке воды через который, дистиллят охлаждается с

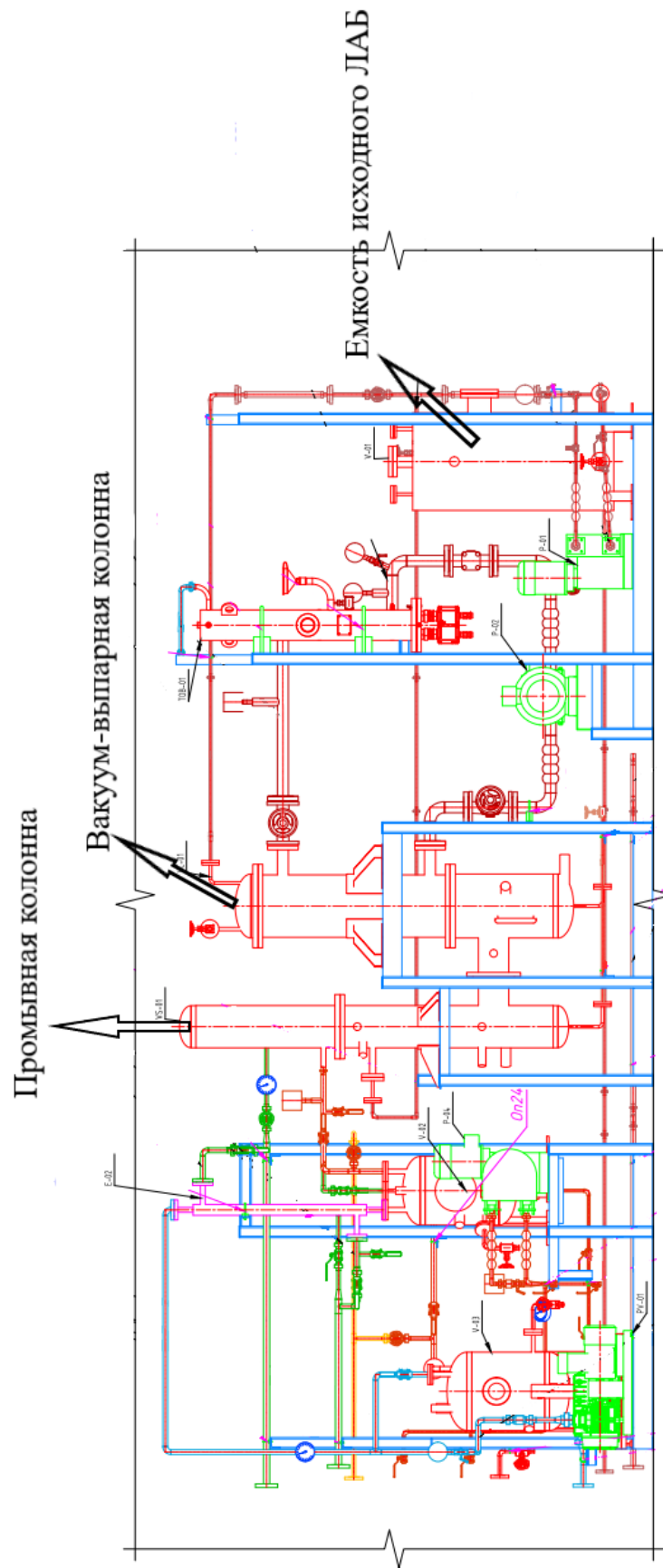


Рисунок 4.4 — Схема развязки установки вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции.

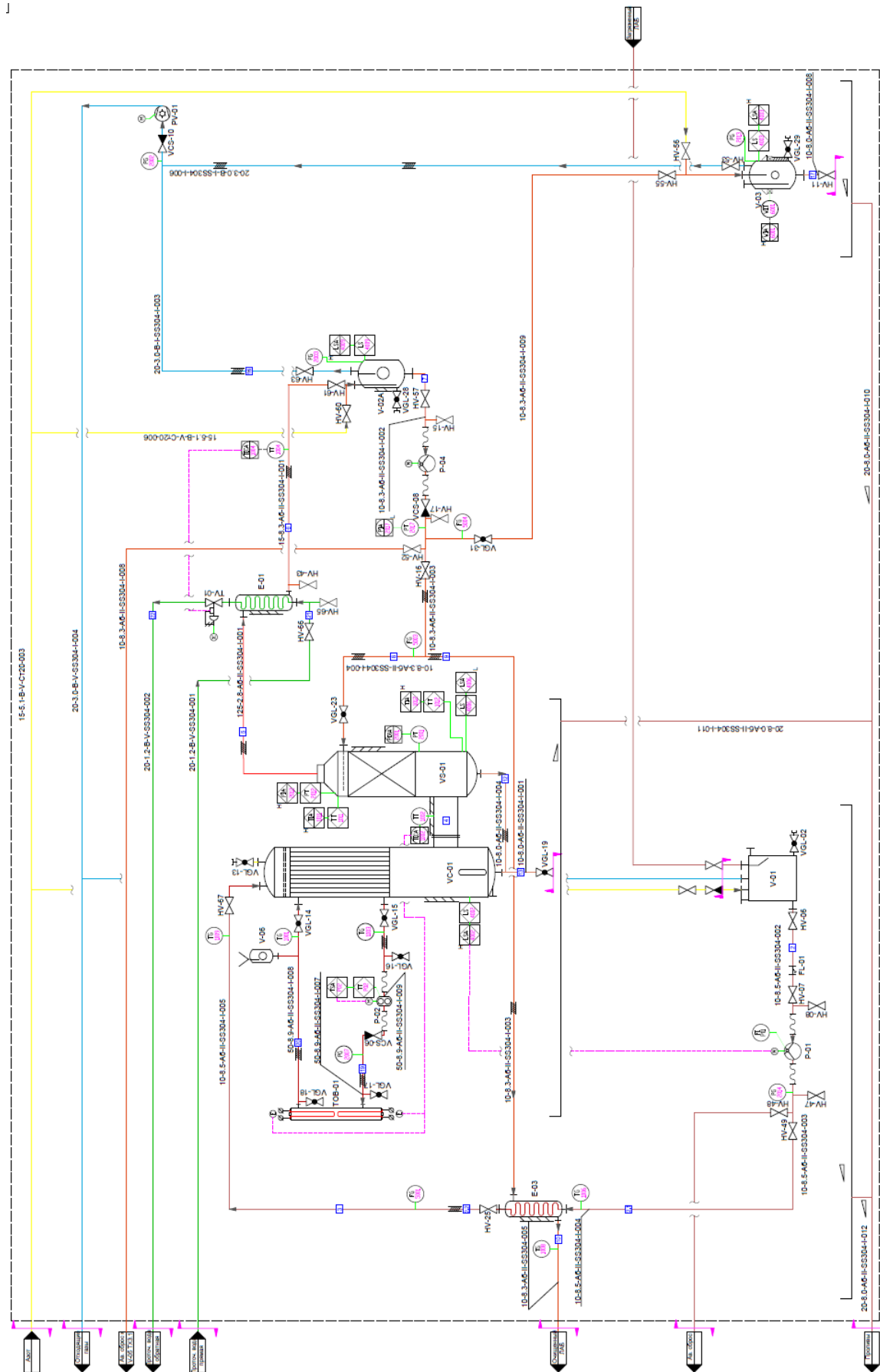


Рисунок 4.5 — Принципиальная технологическая схема установки вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции.

186,3°C до 40°C. Контроль уровня осуществляют по месту при помощи смотрового окна. Температура конденсата контролируется в автоматическом режиме датчиком ТТ 1004. Часть жидкой фазы идет в виде флегмы на орошение колонны VS-01. Расход флегмы контролируется ротаметром, регулирование расхода осуществляется вентилем VGL-03.

При достижении максимального уровня в емкости V-02 часть охлажденного конденсата самотеком поступает в емкость V-03. Уровень в емкости V-03 контролируется датчиком LS-4003 в автоматическом режиме. При заполнении емкостей скачивание очищенного алкил бензола ведут после развакуумирования емкостей V-02, V-03. Контроль давления в емкостях V-02, V-03 осуществляется визуально по манометрам PG-2003, PG-2013. Очищенный и охлажденный ЛАБ скачивается из емкостей насосом P-04 и выводится за границу установки. Давление в напорной линии насоса P-04 контролируется датчиком давления РТ-2017.

Несконденсированные пары из сборника V-02, охлаждаются в теплообменнике E-02 с 186,3°C до 40°C проточной водой и отводятся вакуумным насосом PV-01 на систему улавливания. Контроль вакуума (в пределах 5 мбар (абс.)) в контуре выпарной колонны ведут с помощью датчика давления РТ-2001. Дополнительный контроль давления в системе так же осуществляется по месту при помощи манометра PG-2002, установленного на входе в вакуумный насос PV-01. Температуру паров на выходе из теплообменника E-02 контролируют термометром TG-1005.

Уровень в массообменной колонне VS-01 контролируют в автоматическом режиме при помощи сигнализатора уровня LS-4006, установленного в кубе. Контроль температуры и давления паров в колонне ведут по датчикам ТТ-1011, ТТ-1012, РТ-2012, установленных вверху колоны и в кубе. Конденсат линейного алкилбензола из куба массообменной колонны VS-01 через нижний штуцер самотеком поступает в трубопровод выхода концентрата из выпарной колонны VC-01. Далее концентрат выводится за пределы установки.

Работа теплового контура для нагрева среды в выпарном аппарате VC-01 организована следующим образом: заполнение контура теплоносителем осуществляется вручную через котел ТОВ-01. Нагретый в электрическом котле ТОВ-01 теплоноситель до температуры 197°C подается в межтрубное пространство теплообменника пленочного испарителя, где за счет отдачи тепла на нагрев среды, находящейся в испарителе, охлаждается до 195°C. Цирку-

ляция теплоносителя в контуре обеспечивается шестеренчатым насосом Р-02. Нагрев и контроль температуры теплоносителя в контуре осуществляется в автоматическом режиме при помощи электротенов котла ТОВ-01 и датчика температуры ТТ-1002, установленного на трубопроводе циркуляционного контура. Контроль температуры нагретого теплоносителя осуществляется по месту при помощи термометра ТГ-1003. Давление в контуре контролируется по месту при помощи манометра РГ-2007. В случае возникновения аварийной ситуации (разгерметизации оборудования) предусмотрены отдельные аварийные линии для скачивания всего содержимого из разгерметизированного оборудования в аварийную емкость V-05. Все возможные проливы собираются в поддоны. При наличии жидкости в поддонах запускается насос для скачивания в аварийную емкость.

Воздушная среда постоянно контролируется с помощью газоанализатора на содержание в ней паров ЛВЖ, которое не должны превышать 10% НКПВ; при превышении концентрации паров ЛВЖ срабатывает световая и звуковая сигнализация и происходит остановка всей установки.

4.3 Хроматографическая очистка в колонне, заполненной оксидом алюминия

Хроматографический метод был предложен русским ученым М.С. Цветом в 1903 году на биологической секции Варшавского сообщества естественных наук. Хроматография представляет собой физико-химический метод разделения и определения веществ, основанный на распределении компонентов вещества между подвижной и неподвижной фазами. Для разделения компонентов раствор пропускают через твердый, нерастворимый, неорганический или органический материал, который находится в измельченной форме для увеличения контактируемой поверхности. В основе любого хроматографического разделения лежит различие в скорости перемещения компонентов анализируемой смеси. Однако это различие лишь условное, поскольку сами вещества транспортируются движущейся фазой, скорость которой остается постоянной. Реальные отличия возникают из-за различий во времени удерживания веществ на стационарной фазе. Хроматография представляет собой сложный процесс,

включающий многократные акты сорбции и десорбции, а также растворения и вымывания веществ, каждый из которых сопровождается установлением нового состояния равновесия. Если в качестве стационарной фазы используется активный твердый материал, такую систему относят к адсорбционной хроматографии. Разделение компонентов происходит за счет различий в степени их взаимодействия с поверхностью сорбента: одни вещества сильнее удерживаются (адсорбируются), другие легче покидают поверхность (десорбируются). По мере прохождения вещества через слой сорбента устанавливается динамическое равновесие между его адсорбированной формой и растворенной в подвижной фазе. Благодаря множественным циклам адсорбции и десорбции даже незначительные различия в адсорбционных свойствах веществ обеспечивают эффективное разделение компонентов смеси. Более подробно процесс и основные принципы хроматографической очистки рассмотрены в работах [117—119].

4.3.1 Разработка методики хроматографической очистки

Разработка методики хроматографической очистки проводилась в несколько этапов, в качестве адсорбента использовался оксид алюминия (Al_2O_3). Каждый этап отличался исходным ЛАБ, который был получен из разных источников, оксидом алюминия разных производителей. Очистка проводилась с помощью хроматографической колонки. Для увеличения производительности процесс проходил при пониженном давлении, для создания которого использовался вакуумный насос MZ 1C производителя Vacuubrand. Хроматографическая колонка показана на рисунке 4.6.

На первом этапе производилась очистка ЛАБ от неизвестного поставщика с помощью оксида алюминия, произведенного компанией «ХимЛаб», с размерами гранул более 50 мкм. Очистка проводилась через неактивированный оксид алюминия на колонке диаметром 1 см. Масса Al_2O_3 - 22.78 гр. Объем - 25 мл. Высота в колонке - 78 мм. ЛАБ пропусклся в соотношении объемов $V_{Al_2O_3} : V = 1:2$. Всего было очищено 20 объемов линейного алкилбензола по сравнению с Al_2O_3 . Поглощение всех образцов было измерено с помощью спектрофотометра Perkin Elmer Lambda 35. В качестве кюветы сравнения использовалась



Рисунок 4.6 — Хроматографическая колонка, заполненная оксидом алюминия.

пустая кювета длиной 1 см. По результатам измерений были получены спектры поглощения, показанные на рисунке 4.7.

Расчет длины ослабления проводился по формуле:

$$L_n = \frac{l_{cuv}}{2.3 \times (A_n - A_{min})},$$

где l_{cuv} - разница длин кюветы образца и кюветы сравнения, м; A_n - значение поглощения при определенной длине волны; A_{min} - минимальное значение поглощения. Данные поглощения, длины ослабления света при длинах волн 420, 430, 440 нм приведены в таблице 10.

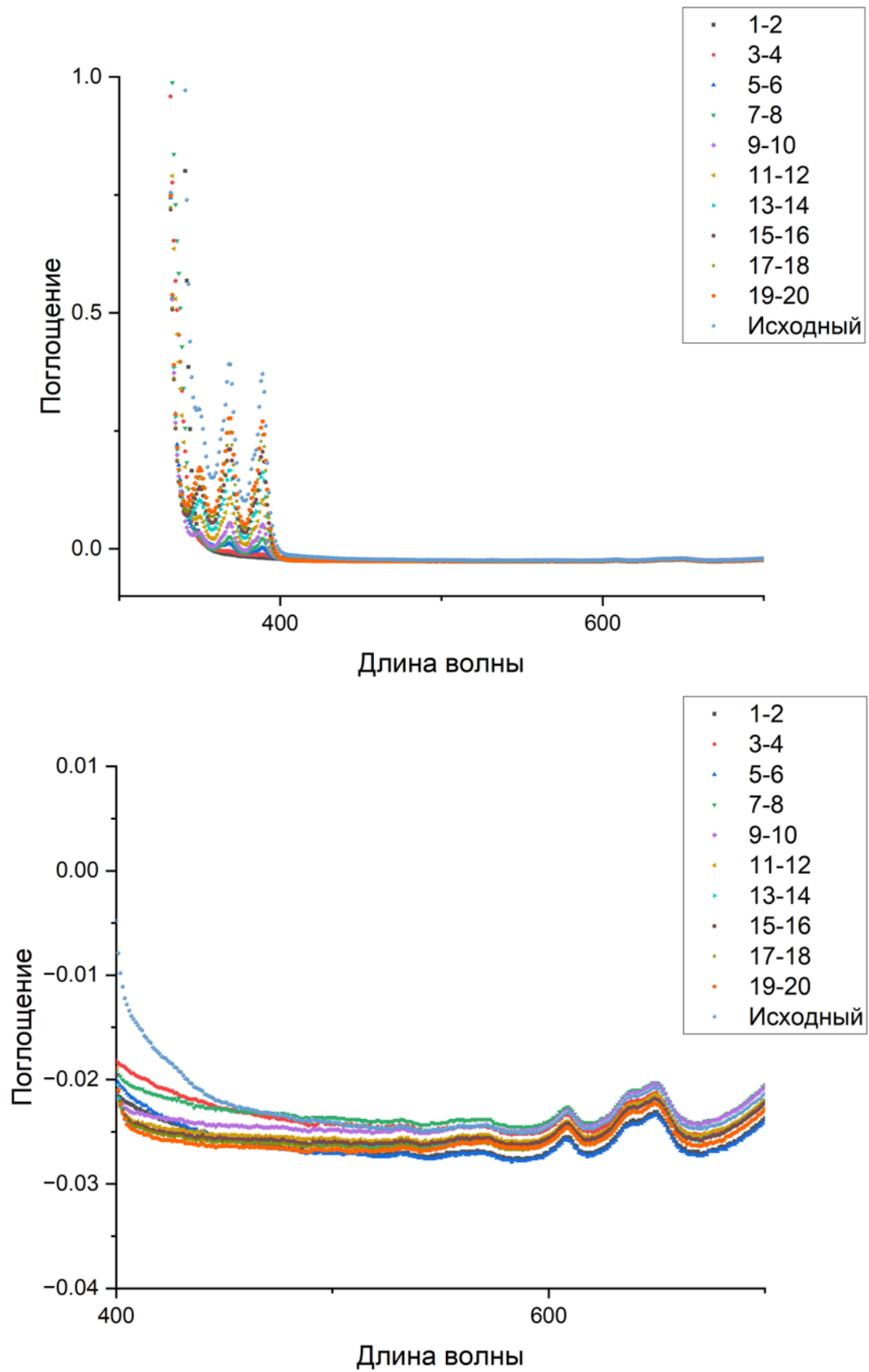


Рисунок 4.7 — Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки.

Порция	A_{min}	A_{420}	A_{430}	A_{440}	L_{420}	L_{430}	L_{440}
1-2	-0.0276	-0.0238	-0.0245	-0.0252	11.4	14	18.1
3-4	-0.0254	-0.0208	-0.0215	-0.0221	9.5	11.1	13.2
5-6	-0.0279	-0.0235	-0.0244	-0.0251	9.9	12.4	15.5
7-8	-0.0246	-0.0215	-0.0221	-0.0225	14	17.4	20.7
9-10	-0.0251	-0.0236	-0.0238	-0.0241	28.9	33.4	43.4
11-12	-0.026	-0.0245	-0.0248	-0.0249	28.9	36.2	39.5
13-14	-0.0264	-0.0251	-0.0253	-0.0255	33.4	39.5	48.3
15-16	-0.0263	-0.0249	-0.0252	-0.0253	31	39.5	43.5
17-18	-0.0268	-0.0252	-0.0254	-0.0257	27.1	31	39.5
19-20	-0.027	-0.0257	-0.0259	-0.0261	33.4	39.5	48.3
Исходный	-0.0252	-0.0175	-0.0193	-0.0211	5.6	7.3	10.6

Таблица 10 — Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки

Как следует из результатов измерений, отображенных в таблице, качество очистки значительно улучшается по мере увеличения объема, пропущенного через адсорбент. Возможно это связано с использованием неподходящих пипеток, так как от отбора первых 4 проб были использованы пластиковые пипетки, для остальных проб использовались стеклянные пипетки.

На следующем этапе очистке подвергался линейный алкилбензол, полученный из Курчатовского комплекса химических исследований (ИРЕА). Использовался новый оксид алюминия из «ХимЛаба», не активированный. Масса Al_2O_3 - 23.4 гр. Объем - 25 мл. Высота в колонке 88 мм. Было пропущено 24 объема, ЛАБ пропускался в соотношении объемов $V_{Al_2O_3} : V = 1:2$. Также был отобран образец исходного ЛАБ. Для всех образцов были получены спектры поглощения, после чего были рассчитаны длины ослабления света. Спектры поглощения показаны на рисунке 4.8, значения поглощения и длины ослабления света для длин волн 420, 430, 440 нм приведены в таблице 11.

Длина ослабления исходного образца очень низкая и составляет порядка 30 см, но после очистки первых двух объемов увеличивается до 3.8 м при длине волны 420 нм и постепенно снижается. Однако даже после пропускания ЛАБ через оксид алюминия в соотношении 24:1 длина ослабления остается выше исходной в 7.6 раз и составляет 2.3 м на длине волны 420 м.

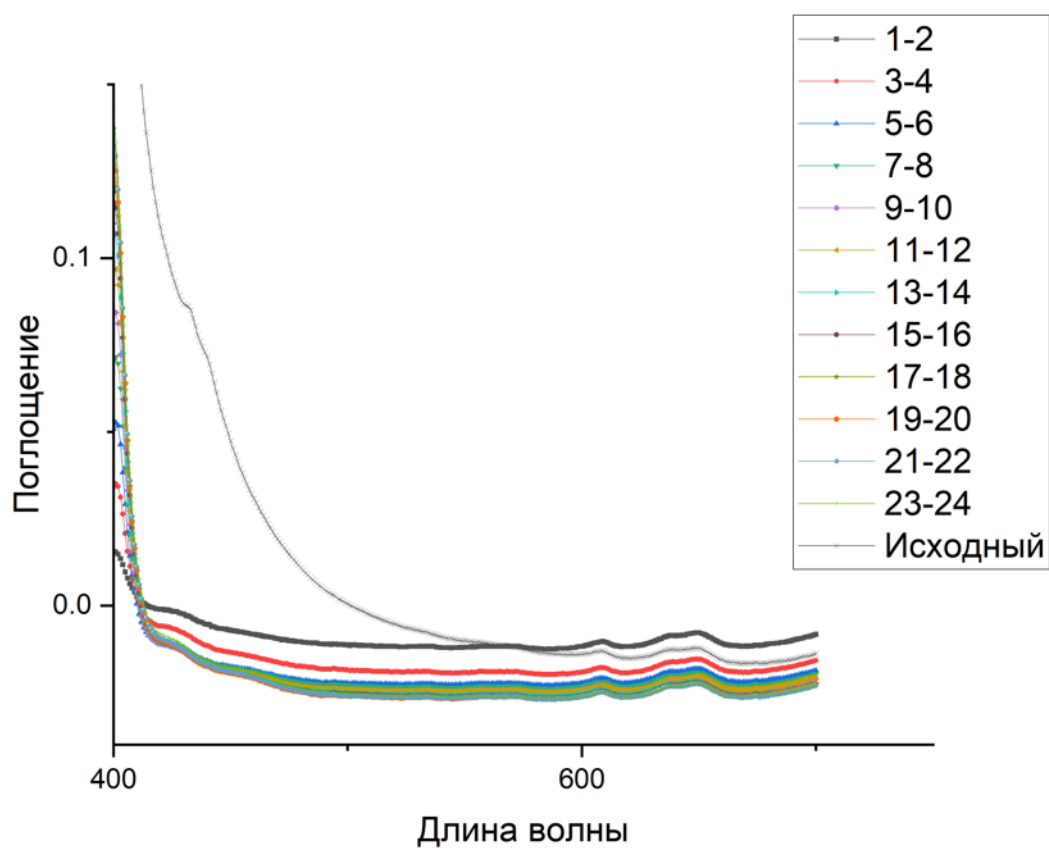
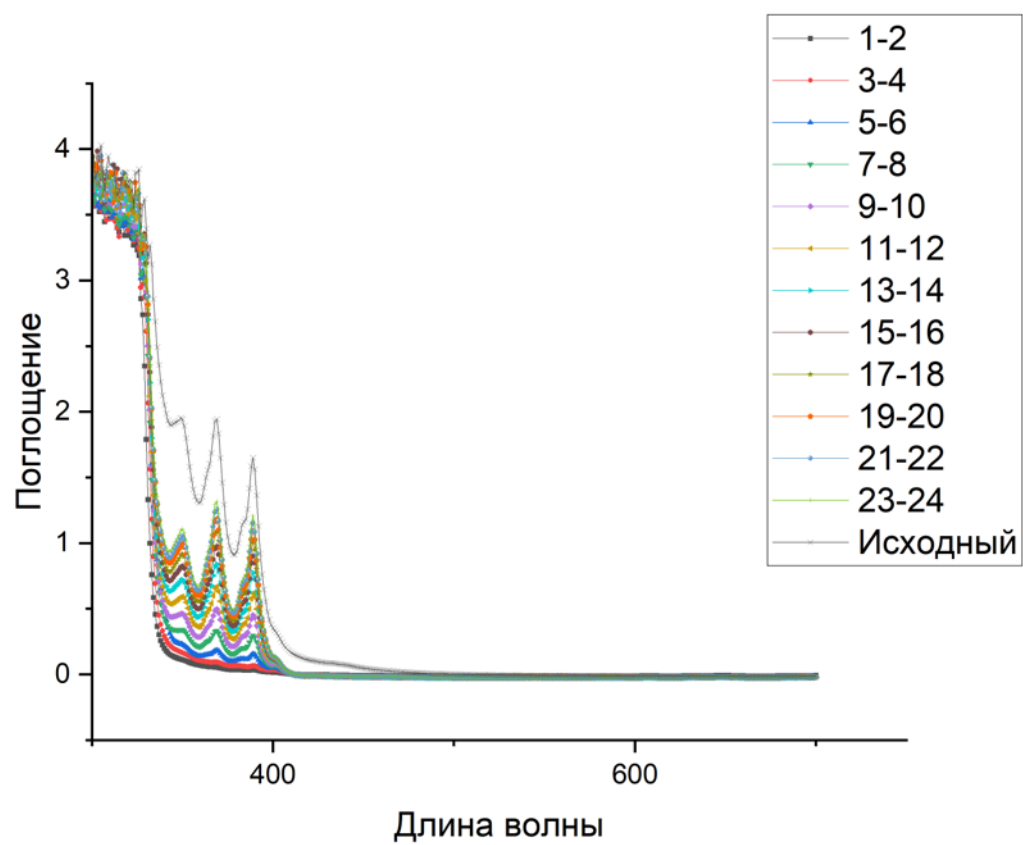


Рисунок 4.8 — Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки.

Порция	A_{min}	A_{420}	A_{430}	A_{440}	L_{420}	L_{430}	L_{440}
1-2	-0.0125	-0.0011	-0.0024	-0.0054	3.8	4.3	6.1
3-4	-0.0198	-0.0059	-0.0079	-0.0115	3.1	3.6	5.2
5-6	-0.0231	-0.0104	-0.0122	-0.0159	3.4	4	6
7-8	-0.024	-0.0102	-0.0122	-0.016	3.1	3.7	5.4
9-10	-0.0251	-0.0111	-0.0133	-0.0172	3.1	3.7	5.5
11-12	-0.0251	-0.0104	-0.0127	-0.0167	2.9	3.5	5.2
13-14	-0.0262	-0.0105	-0.0131	-0.0171	2.7	3.3	4.8
15-16	-0.0267	-0.0103	-0.013	-0.0171	2.6	3.2	4.5
17-18	-0.0267	-0.0102	-0.013	-0.0172	2.6	3.2	4.6
19-20	-0.027	-0.0101	-0.0131	-0.0174	2.6	3.1	4.3
21-22	-0.027	-0.0095	-0.0126	-0.017	2.5	3	4.3
23-24	-0.0269	-0.0081	-0.0114	-0.0158	2.3	2.8	3.9
Исходный	-0.0167	0.1089	0.0868	0.0717	0.3	0.4	0.5

Таблица 11 — Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки

Далее, уже очищенный на предыдущем этапе линейный алкилбензол повторно пропускался через новый неактивированный Al_2O_3 объемом 25 мл, массой 23.39 гр, высота в колонке составила 87 мм. Целью было выяснение целесообразности повторной хроматографической очистки для улучшения оптических свойств. Результаты данного этапа приведены в таблице 12, спектры поглощения показаны на рисунке 4.9.

Повторное пропускание ЛАБ через новую порцию оксида алюминия заметно повышает длину ослабления света, увеличивая длину ослабления для 4 объемов до 6.9 м на длине волны 420 нм, затем длина ослабления постепенно доходит уровня первой очистки. Тем не менее, длина ослабления света 10 объемов ЛАБ, пропущенных через один объем оксида алюминия, после второй прогонки получается выше. Таким образом, повторная хроматографическая очистка показывает улучшение качества линейного алкилбензола для меньшего количества растворителя и требует более частой замены адсорбента.

На следующем этапе в качестве адсорбента был использован оксид алюминия, произведенным Донецким заводом химреактивов (1988 г.). Объем неактивированного адсорбента составил 25 мл, масса составила 32.43 гр, высота в колонке – 79 мм. Соотношение объема, очищенного ЛАБ к оксиду алюминия,

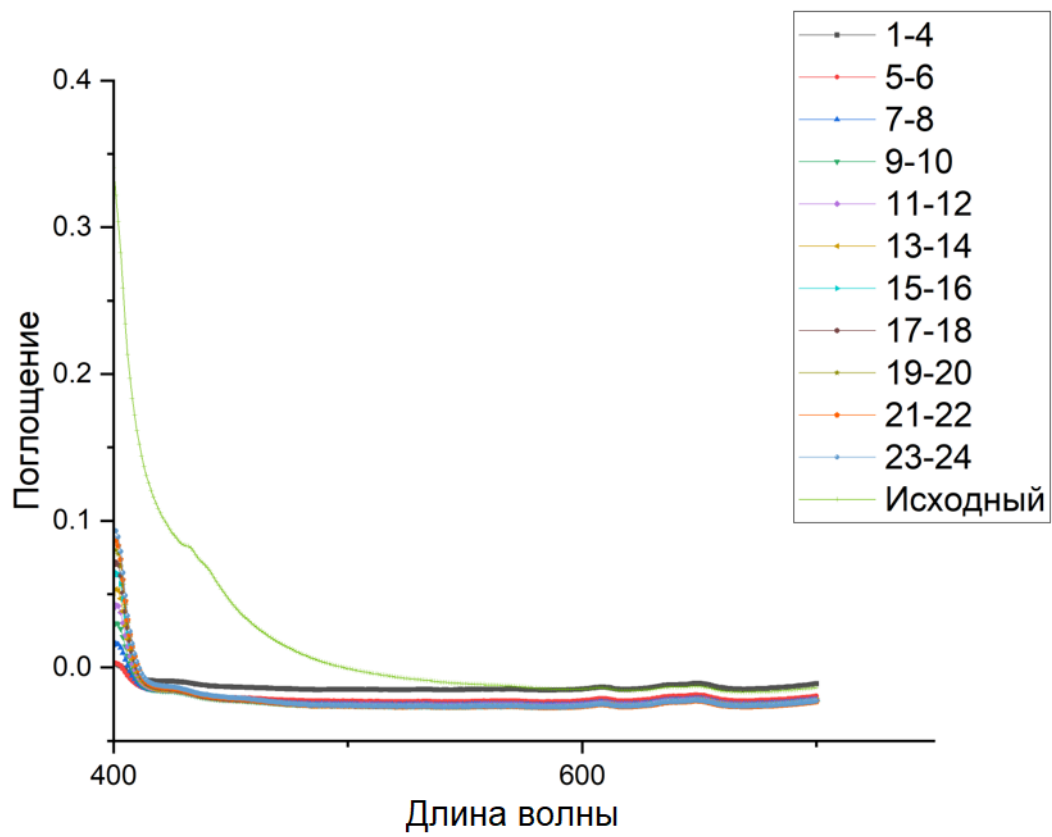
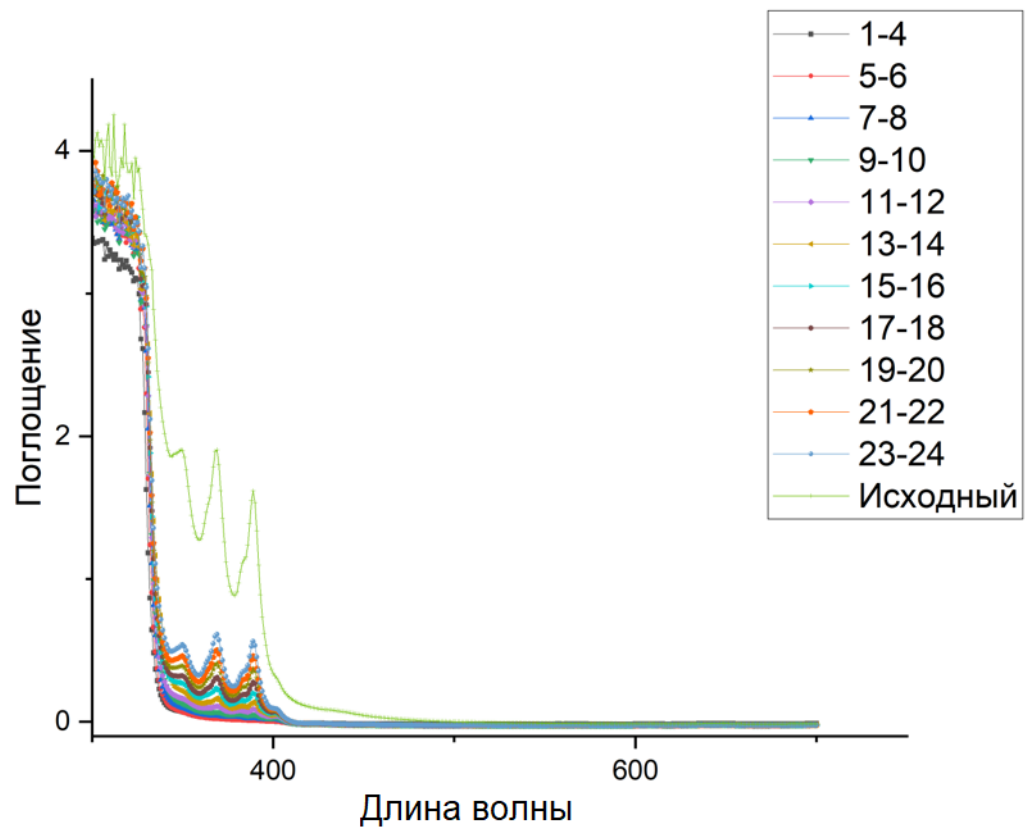


Рисунок 4.9 — Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки.

Порция	A_{min}	A_{420}	A_{430}	A_{440}	L_{420}	L_{430}	L_{440}
1-4	-0.0154	-0.0091	-0.01	-0.0122	6.9	8.05	13.6
5-6	-0.0234	-0.0153	-0.0164	-0.0192	5.4	6.2	10.3
7-8	-0.0256	-0.0159	-0.0173	-0.0204	4.5	5.2	8.4
9-10	-0.0261	-0.0155	-0.0172	-0.0206	4.1	4.9	7.9
11-12	-0.0262	-0.015	-0.0168	-0.0203	3.9	4.6	7.4
13-14	-0.027	-0.0149	-0.0168	-0.0204	3.6	4.3	6.6
15-16	-0.0272	-0.0135	-0.0157	-0.0197	3.2	3.8	5.8
17-18	-0.027	-0.014	-0.0161	-0.02	3.3	4	6.2
19-20	-0.0271	-0.0136	-0.0157	-0.0195	3.2	3.8	5.7
21-22	-0.0273	-0.0134	-0.0156	-0.0195	3.1	3.7	5.6
23-24	-0.0268	-0.0124	-0.0148	-0.0186	3	3.6	5.3
Исходный	-0.0149	0.1052	0.0835	0.0682	0.36	0.44	0.52

Таблица 12 — Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после повторной хроматографической очистки

составило 8 к 1. Результаты данного этапа приведены в таблице 13, спектры поглощения показаны на рисунке 4.10.

Порция	A_{min}	A_{420}	A_{430}	A_{440}	L_{420}	L_{430}	L_{440}
1-2	0.028	0.0249	0.021	0.0181	1.9	2.4	2.8
3-4	-0.0023	0.0275	0.0225	0.0194	1.5	1.8	2
5-6	0.025	0.0636	0.0578	0.0522	1.1	1.3	1.6
7-8	-0.0282	0.0114	0.0048	-0.0002	1.1	1.3	1.6
Исходный	0.0134	0.1431	0.1192	0.1008	0.3	0.4	0.5

Таблица 13 — Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки с помощью неактивированного адсорбента

Качество очистки с помощью оксида алюминия данного производителя хуже, чем при очистке с помощью оксида алюминия от компании «ХимЛаб». Максимальная длина ослабления составила 1.9 м при длине волны 420 нм для первых двух объемов, пропущенного ЛАБ. Длина ослабления после 8 объемов составляет 1.1 м. Порция №7-8 протекала сквозь оксид алюминия при атмосферном давлении в течение 12 часов, таким образом качество очистки не зависит от времени протекания растворителя через адсорбент.

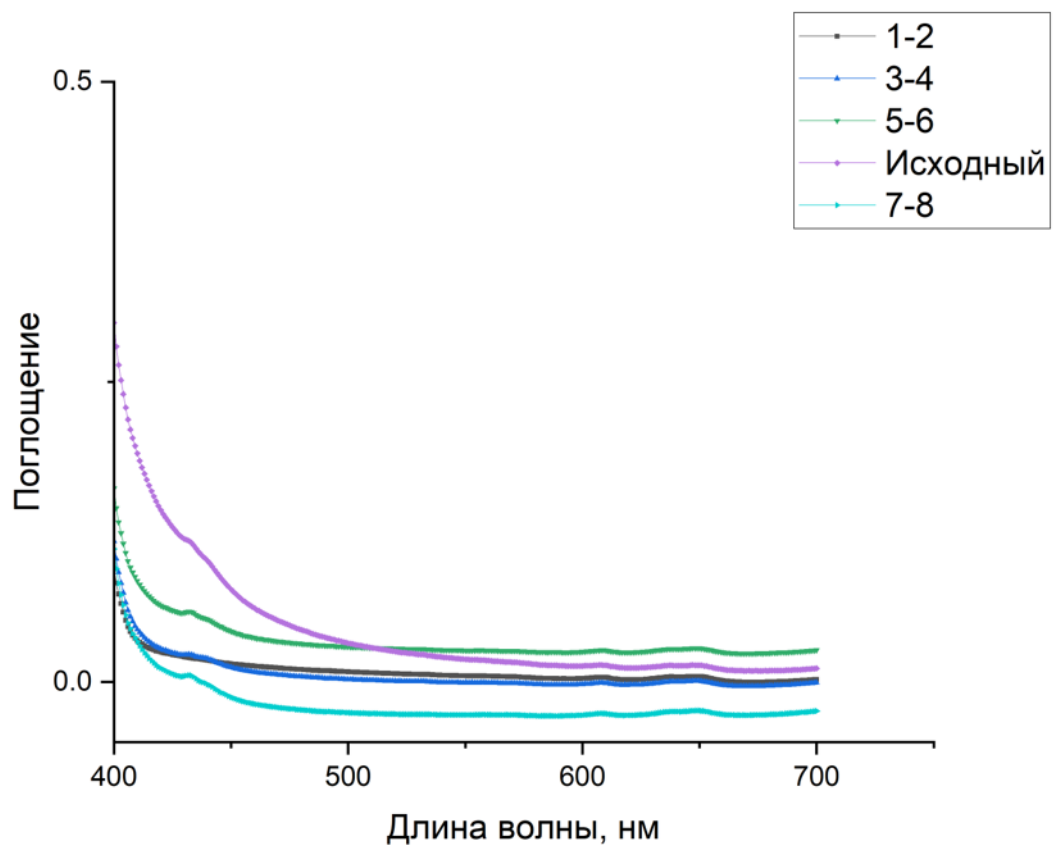
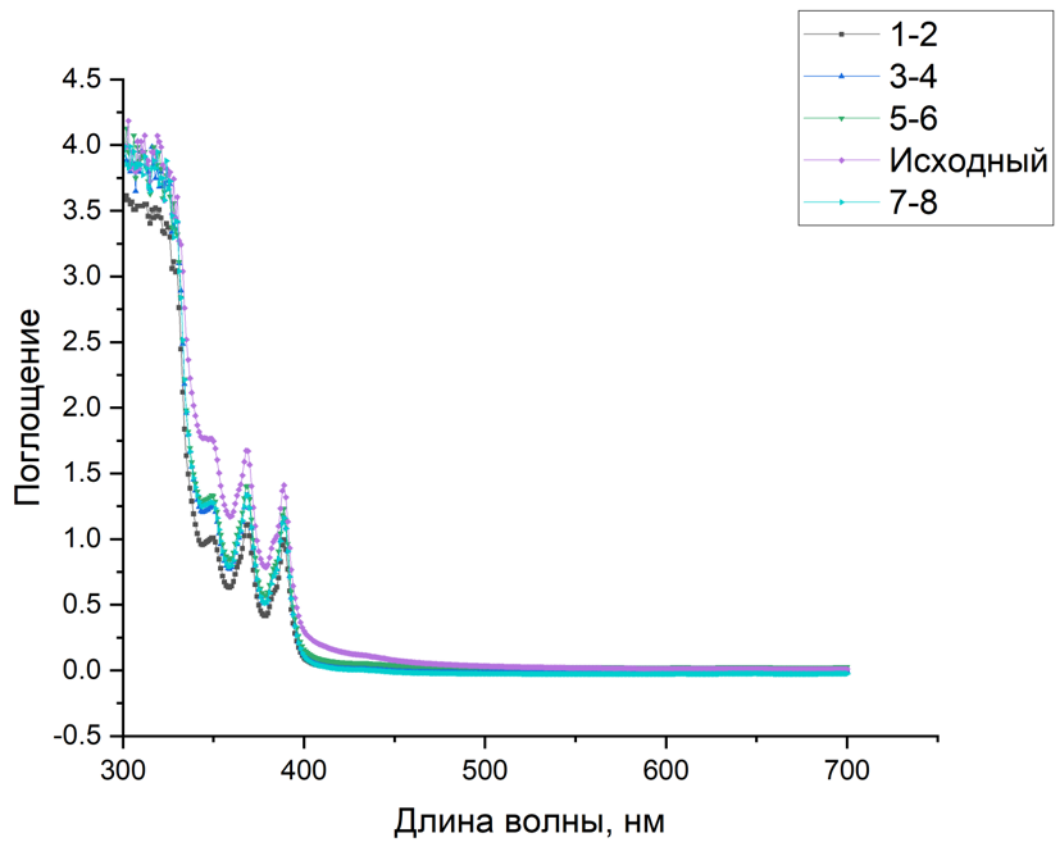


Рисунок 4.10 — Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки.

Для улучшения качества очистки оксид алюминия, полученный от компании «ХимЛаб», был процессу активации. Активация сорбента - это процесс подготовки сорбционного материала (сорбента) к эффективному поглощению (сорбции) различных веществ из газовой или жидкой среды. Цель активации - увеличить удельную поверхность, пористость и химическую активность сорбента, чтобы повысить его способность захватывать целевые вещества. В зависимости от типа сорбента и его назначения активация может быть физической, химической. К физической активации относится термическая обработка вещества, а также воздействие ультразвуком. Термическая обработка представляет собой прокаливание при высоких температурах, удаляя воды и другие летучие элементы, которые негативно влияют на сорбционные свойства. Обработка ультразвуком способствует разрушению гранул адсорбента, увеличивая площадь поверхности. Химическая активация включает обработку сорбента химическими реагентами (щелочами, кислотами, солями или окислителями) перед или во время нагрева. Такая обработка способствует образованию развитой микропористой структуры и повышению сорбционных свойств. Также применяется метод модификации поверхности, который заключается в добавлении на поверхность сорбента функциональных групп, улучшающих селективность или связывающие определенные молекулы. Например, введение аминогрупп для захвата CO_2 или ионов тяжелых металлов.

Прокаливание проводилось в сушильном шкафу в пониженном давлении при температуре $250^\circ C$ в течение 8 часов. Масса исходного продукта составляла 58.89 гр, после отжига $M_{Al_2O_3}$ - 56.39 гр, потеря массы составила 2.5 гр или 4.3%. Объем оксида алюминия в колонке был равен 50 мл, соотношение очищенного ЛАБ к адсорбенту составило 8 к 1. Результаты данного этапа приведены в таблице 14, спектры поглощения показаны на рисунке 4.11.

Порция	A_{min}	A_{420}	A_{430}	A_{440}	L_{420}	L_{430}	L_{440}
1-2	0.027	0.0382	0.0363	0.0345	3.88	4.68	5.8
3-6	-0.0067	0.0077	0.0046	0.002	3.01	3.85	4.99
7-8	-0.017	-0.0002	-0.0038	-0.0066	2.59	3.29	4.18
Исходный	-0.0187	0.0978	0.0762	0.0606	0.37	0.46	0.55

Таблица 14 — Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки с помощью активированного адсорбента

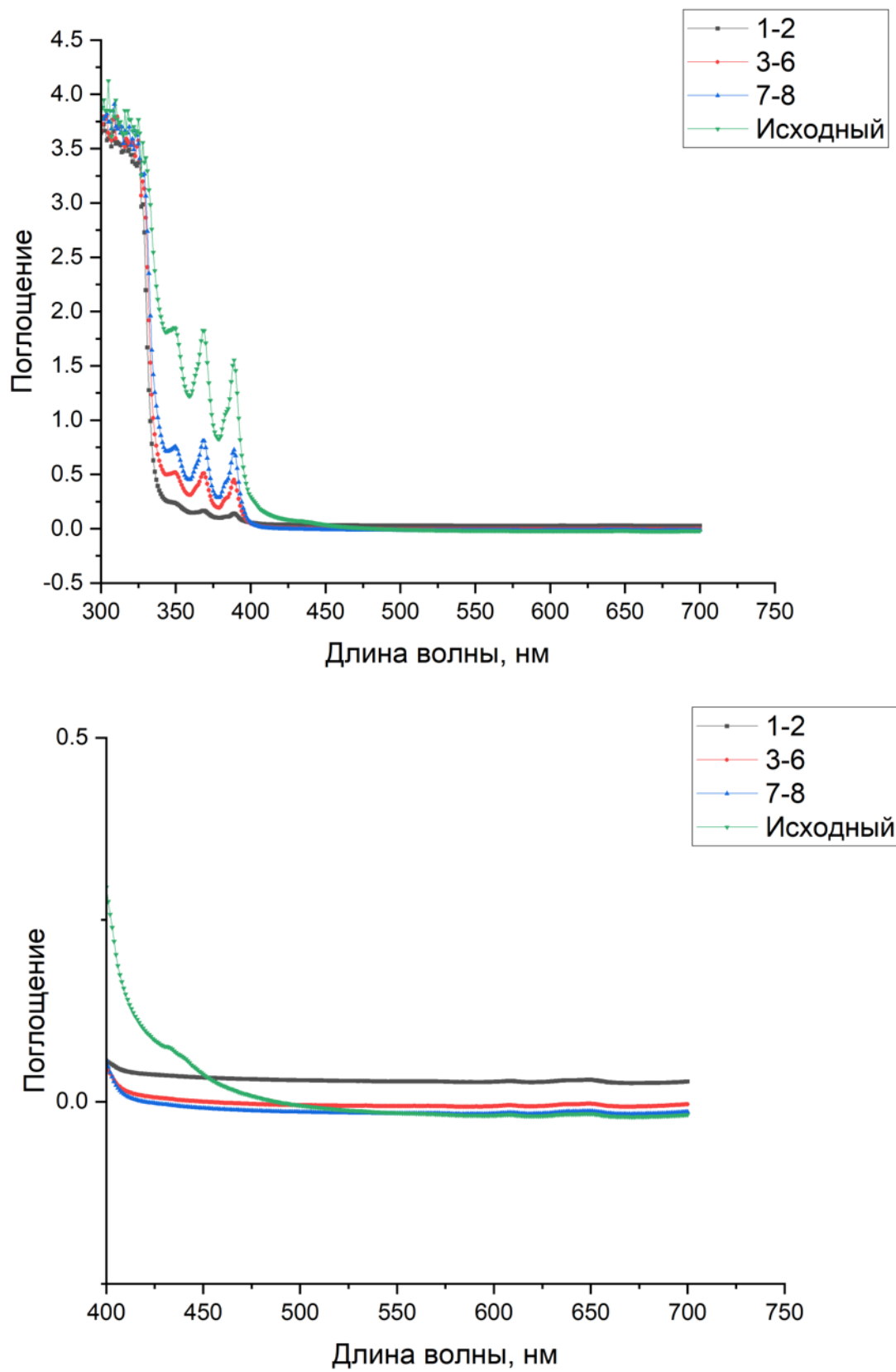


Рисунок 4.11 — Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки.

Как видно из результатов измерения поглощения, отжиг оксида алюминия из компании «ХимЛаб» не влияет на качество очистки, длина ослабления первый двух объемов идентична длине ослабления после очистки не активированным адсорбентом.

Для сравнения активации также подвергся оксид алюминия, произведенный Донецким заводом химреактивов. Масса до отжига составляла 55.62 гр, после отжига – 55.22 гр, потеря составила 0.4 гр. Прокаливание осуществлялось по той же методике в течение 8 часов при температуре 250°C. Объем Al_2O_3 в колонке был равен 50 мл, соотношение очищенного ЛАБ к адсорбенту составило 8 к 1. Пробы ЛАБ после пропускания через Al_2O_3 повторно пропускали через фильтровальную бумагу, так как донецкий оксид алюминия не фракционирован и проходит сквозь стеклянный фильтр колонки. Результаты данного этапа приведены в таблице 15, спектры поглощения показаны на рисунке 4.12.

Порция	A_{min}	A_{420}	A_{430}	A_{440}	L_{420}	L_{430}	L_{440}
1-2	-0.0194	-0.0058	-0.0081	-0.0104	3.19	3.85	4.83
3-6	-0.0234	-0.01	-0.0129	-0.0153	3.24	4.14	5.37
7-8	-0.0254	-0.0115	-0.0149	-0.0177	3.12	4.14	5.65
Исходный	-0.0187	0.0978	0.0762	0.0606	0.37	0.46	0.55

Таблица 15 — Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки с помощью активированного адсорбента

Активация Al_2O_3 донецкого завода значительно улучшает качество очистки по сравнению с неактивированным оксидом алюминия. Длина ослабления света для всех образцов составляет более 3 метров в то время, как первые 2 объема после очистки неактивированным адсорбентом имеют длину ослабления 1.9 м и быстро уменьшается до 1 метра. Таким образом, отжиг адсорбента является необходимым требованием перед началом очистки, так как условия производства и хранения оксида алюминия неизвестны.

Данный оксид алюминия был просеян через лабораторное сито с размером ячейки 56 мкм, затем подвергся отжигу. Для очистки использовался линейный алкилбензол, который будет применяться в прототипе с массой мишени 5 тонн. Была использована хроматографическая колонка диаметром 3 см, масса Al_2O_3 составила 100 гр, высота в колонке 122 мм, на конце колонке был расположен фторопластовый фильтр с размером пор 5 мкм. Всего было очищено 1360 гр

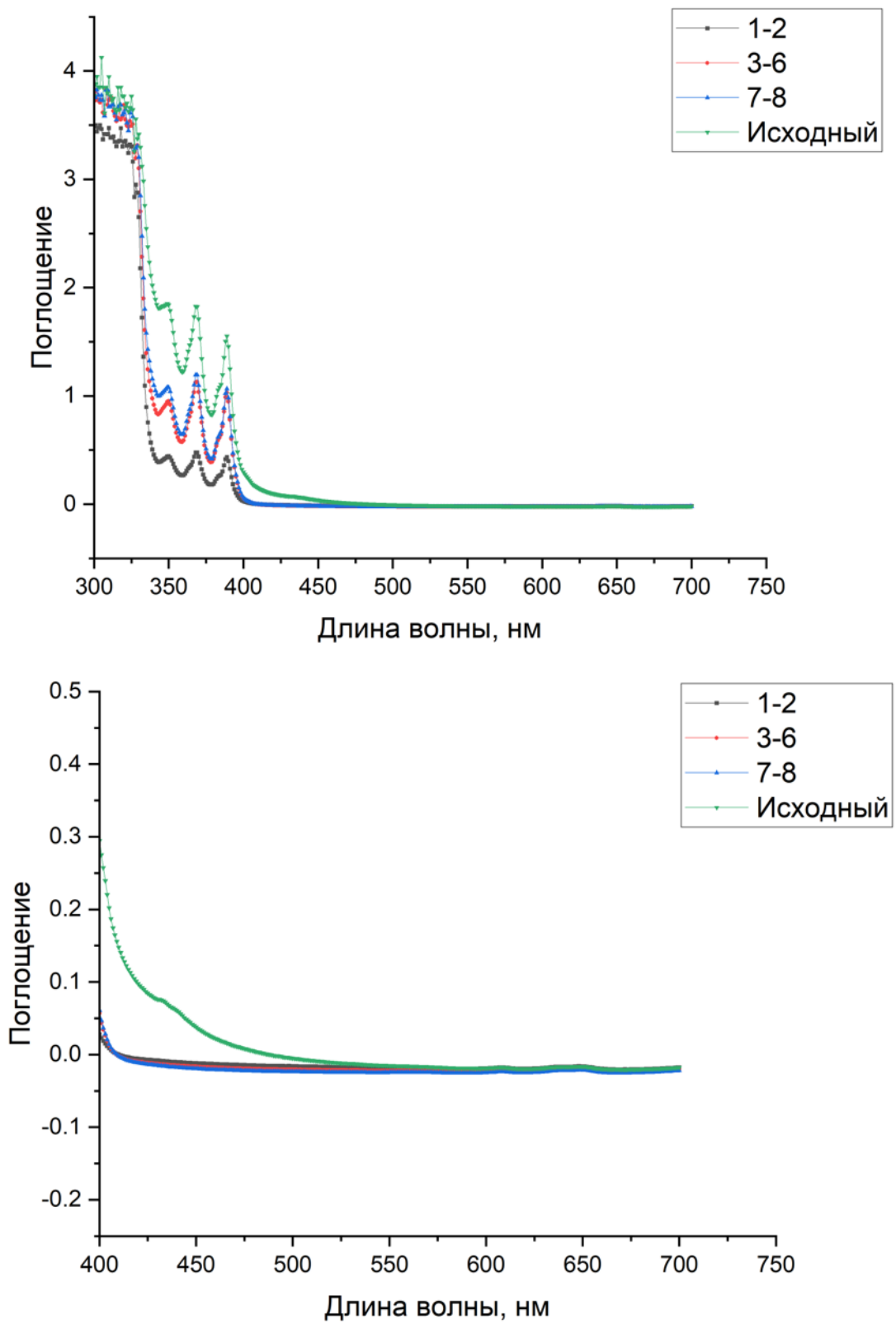


Рисунок 4.12 — Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки.

линейного алкилбензола, результаты данного этапа приведены в таблице 16, спектры поглощения показаны на рисунке 4.13.

Порция	A_{min}	A_{420}	A_{430}	A_{440}	L_{420}	L_{430}	L_{440}
358 гр	-0.0271	-0.0181	-0.0213	-0.0235	4.83	7.49	12.08
317 гр	-0.0275	-0.0178	-0.0206	-0.0217	4.48	6.3	7.49
30 гр	-0.0275	-0.0199	-0.0221	-0.0224	5.72	8.05	8.53
358 гр	-0.0288	-0.0211	-0.0233	-0.0236	5.56	7.91	8.36
260 гр	-0.0302	-0.0086	-0.0124	-0.0148	2.01	2.44	2.82
36 гр	-0.0302	-0.0084	-0.0128	-0.0156	1.99	2.49	2.98
Исходный	-0.0281	0.0014	-0.004	-0.0057	1.47	1.8	1.94

Таблица 16 — Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки с помощью активированного адсорбента

Длина ослабления света для исходного ЛАБ, который будет использован в 5-тонном прототипе, составляет 1.47, 1.8 и 1.94 м при длинах волн 420, 430 и 440 нм соответственно. При очистке длина ослабления увеличивается до 5 м для первых 10 масс, прошедших через 1 массу адсорбента.

По результатам всех исследований можно сделать вывод, что качество очистки ЛАБ зависит не только от адсорбента, но и от чистоты исходного растворителя. Чем выше длина ослабления света исходного ЛАБ, тем больше объема можно очистить с помощью одного объема оксида алюминия. При этом при соотношении очищаемого ЛАБ к оксиду алюминия 10:1 длина ослабления всегда выше, чем у исходного продукта. Также адсорбент необходимо подвергать отжигу для удаления из него излишней влаги, а также других компонентов, которые могут ухудшать адсорбционные свойства Al_2O_3 . Для увеличения производительности хроматографической очистки оксид алюминия необходимо фракционировать, просеивая через лабораторное сито, чтобы увеличить размер фракций.

4.3.2 Описание установки хроматографической очистки

Для очистки линейного алкилбензола, предназначенного для заполнения центральной области детектора, была разработана система хроматографиче-

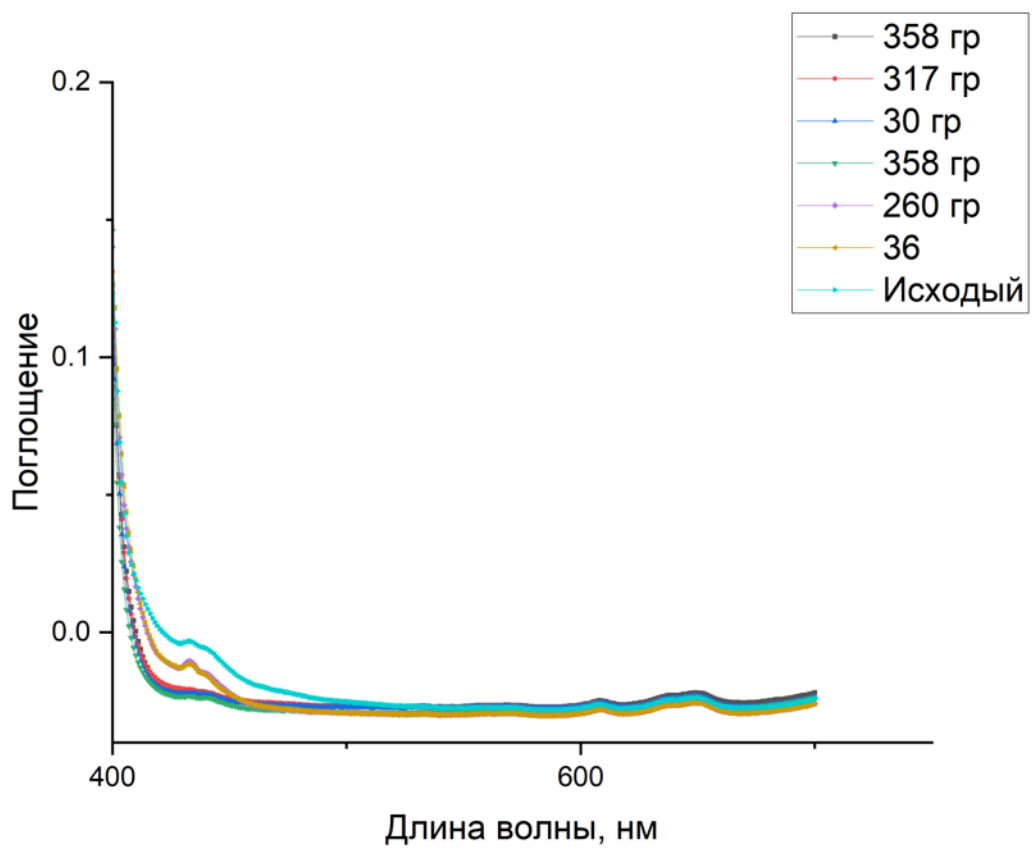
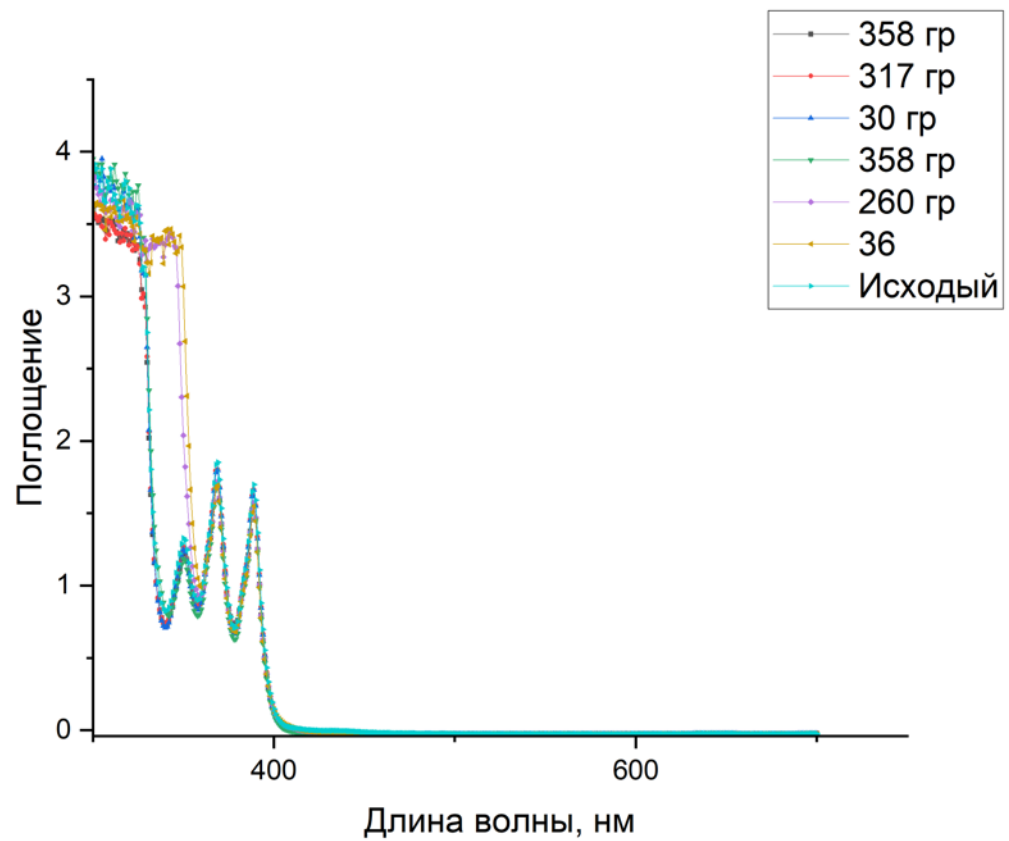


Рисунок 4.13 — Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки.

ской очистки, которая расположена в подземной инфраструктуре БНО в кондиционерном холле лаборатории ГГНТ (рисунок 4.14). Установка представляет собой мобильный универсальный модуль, в состав которого входят сорбционные колонны, насосы, емкости и автоматизированная система управления. Сорбционная часть состоит из шести колонн, работающих параллельно. В зависимости от конкретных условий и задач можно задействовать от одной до шести колонн. Каждая из них оснащена манометром для визуального отслеживания давления и предохранительным клапаном, предназначенным для сброса давления при его превышении. Клапан подключен к аварийной сливной линии. Колонны имеют разборную конструкцию, что позволяет легко извлекать использованную окись алюминия. Для удаления механических загрязнений перед поступлением ЛАБ в колонны используется фторопластовый фильтр с размером пор 20 мкм. После прохождения через колонны, для удаления остатков оксида алюминия, жидкость дополнительно фильтруется через два последовательно установленных фильтра с размерами пор 5 и 0.2 мкм. Очищенный ЛАБ собирается либо в стеклянную приемную колбу из боросиликатного стекла, либо в еврокуб. Подача исходной жидкости в колонны осуществляется мембранными насосами, управление которыми осуществляется с помощью шкафа управления. Чертеж сорбционной установки показан на рисунке 4.15. Основные технические характеристики установки приведены в таблице 17.

4.4 Водная экстракция

Жидкостная экстракция представляет собой метод разделения компонентов раствора и является одним из массообменных процессов химической технологии. Массообменные процессы основаны на неодинаковом равновесном распределении веществ между двумя взаимонерастворимыми фазами ([120]). Водная экстракция применяется для удаления радиоактивных примесей, таких как ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , присутствующих в составе жидкого сцинтиллятора. Полярные ионы тяжелых металлов имеют более высокую растворимость в полярных молекулах воды, чем в неполярных молекулах сцинтиллятора. Вода имеет ряд преимуществ по сравнению с другими жидкостями, используемыми при жидкостной экстракции. Она совместима с ЛАБ, кроме того, дешевле в про-



Рисунок 4.14 — Установка хроматографической очистки.

изводстве, так как в БНО имеется линия очистки воды, также вследствие этого возможно использование больших объемов воды. Отработанную воду легко утилизировать, и она не оказывает негативного воздействия на окружающую среду.

В крупнейших промышленных установках используется экстракция с несколькими теоретическими ступенями, а не одностадийная экстракция, поскольку это позволяет достичь более эффективного разделения. Существует множество факторов, влияющих на эффективность экстракции, таких как высота колонны, наличие дополнительного перемешивания, конструкция внутренней части установки, расход воды (F_W), расход сцинтиллятора (F_{LS}), а также температура в процессе экстракции. Теоретические ступени представляют собой математическую модель, которая описывает достижение экстракцией состояния равновесия.

Коэффициент распределения (K_D) является ключевым параметром, определяющим эффективность водной экстракции. Он определяется как отношение концентрации растворенного вещества в водной фазе (C_W) к концентрации в фазе жидкого сцинтиллятора (C_{LS}) после достижения равновесия в одной теоре-

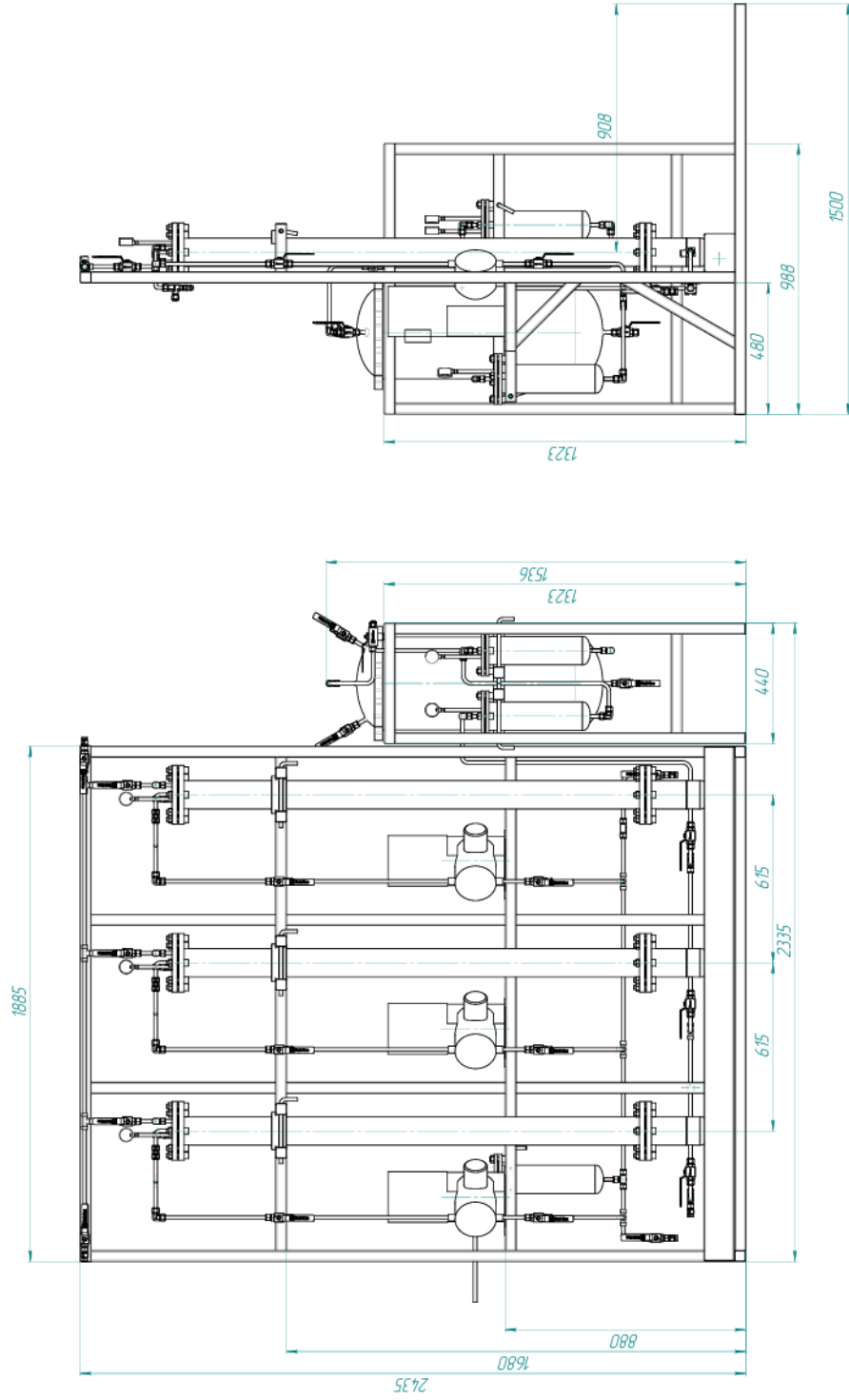


Рисунок 4.15 — Схема установки хроматографической очистки.

Наименование параметра	Значение
Количество сорбционных колонн	6
Максимальное рабочее давление	10 атм
Производительность колонны	До 25 л/ч
Технические характеристики колонн	
Материал	Нержавеющая сталь AISI316
Габаритные размеры	Диаметр – 100 мм Высота насадочной части – 1500 мм Высота колонны – 1930 мм
Материал адсорбента	Оксид алюминия
Материал фильтрующих элементов	Фторопласт-4
Пористость фильтрующих элементов	0.2, 5 и 20 мкм
Материал уплотнений	Силикон
Предохранительный клапан, давление сброса	10 атм
Тип соединения элементов	Фланцевое
Обвязка	Трубопровод из нержавеющей стали AISI316 с внутренним диаметром 4 мм
Технические характеристики насосов	
Модель	Ligao GM25/1.0
Тип	Мембранный дозирующий
Производительность	До 25 л/ч
Рабочее давление	10 бар
Материал проточной части	Нержавеющая сталь AISI316

Таблица 17 — Технические характеристики сорбционной установки

тической ступени. K_D зависит от множества факторов, таких как температура, давления, вид ионов.

$$K_D = \frac{C_W}{C_{LS}}$$



Рисунок 4.16 — Установка водной экстракции.

Концентрация растворенного вещества в фазе жидкого сцинтиллятора после N ступеней определяется выражением:

$$C_{LS}^N = \frac{(1 - \frac{F_{LS}}{F_W \times K_D}) \times (C_{LS}^0 - \frac{C_W^0}{K_D})}{(\frac{F_W \times K_D}{F_{LS}})^N - \frac{F_{LS}}{F_W \times K_D}}$$

Таким образом, конечная концентрация вещества в жидком сцинтилляторе зависит от количества теоретических ступеней, коэффициента распределения и отношения потока жидкого сцинтиллятора к потоку воды.

4.4.1 Описание установки водной экстракции

Для проведения водной экстракции совместно с ООО «Инновационные химические технологии» была разработана установка, основой которой является центробежный экстрактор Solvex 08PTFE. Устройство представляет собой одноступенчатый, безнапорный вертикальный экстрактор с центробежным разделением эмульсии на фазы и перемешиванием в гравитационном поле (рисунок 4.16).

На рисунке 4.17 показана схема внутреннего строения экстрактора, основные характеристики приведены в таблице 18

Наименование параметра	Значение параметра
Производительность, м ³ text	до 0.8
Отношение плотностей исходных растворов, не более	0.98
Отношение расходов исходных растворов	Любое
Рабочий объем камеры смешения, л	1.2
Рабочий объем ротора, л	1.2
Количество ступеней, не менее	0.95

Таблица 18 — Основные параметры центробежного экстрактора Solvex 08PTFE

Экстрактор состоит из двух основных частей: корпуса 1 со смесительной камерой 2 и узла ротора с приводом 3. В качестве привода используется асинхронный двигатель АИС 71В-4. УРП 3 является легко извлекаемой и заменяемой частью экстрактора и состоит из ротора 4, закрепленного на валу электродвигателя 5. В нижней части ротора 4 расположено шнековое транспортирующее устройство (ШТУ) 6 с мешалкой 7. Внутри ротора 4 размещаются крестовина 8, разделительный диск 9, регулируемые трубки вывода легкой фазы 10 и отверстия вывода тяжелой фазы 11. УРП 3 крепится к корпусу экстрактора с помощью многозаходной резьбы. Корпус 1 является базовым узлом экстрактора и состоит из смесительной камеры 2, двух кольцевых сборников разделенных фаз тяжелой 12 и легкой 13, патрубков ввода растворов 14, патрубков вывода растворов из экстрактора 15 для тяжелой фазы, 16 - для легкой фазы, и патрубка 17 - контроль работы экстрактора (аварийный переток). Принцип работы экстрактора основан на проведении двух основных технологических операций: перемешивания исходных растворов в смесительной камере 2 для обеспечения массопередачи и разделения образовавшейся эмульсии в роторе 4 для получения чистых фаз. После сборки и запуска электродвигателя 5 экстрактора исходные растворы подаются по патрубкам ввода 14 в смесительную камеру 2, где перемешиваются мешалкой 7, при этом происходит процесс массопередачи. ШТУ 6 подает эмульсию в ротор (камеру разделения) 4, где под действием центробежного поля происходит разделение эмульсии на тяжелую и легкую фазы. Тяжелая фаза через гидрозатвор 11 выводится из ротора в кольцевой сборник 12 и далее через патрубок 15 - из экстрактора. Легкая фаза выводится через трубки 10 в кольцевой сборник 13 и далее через патрубок

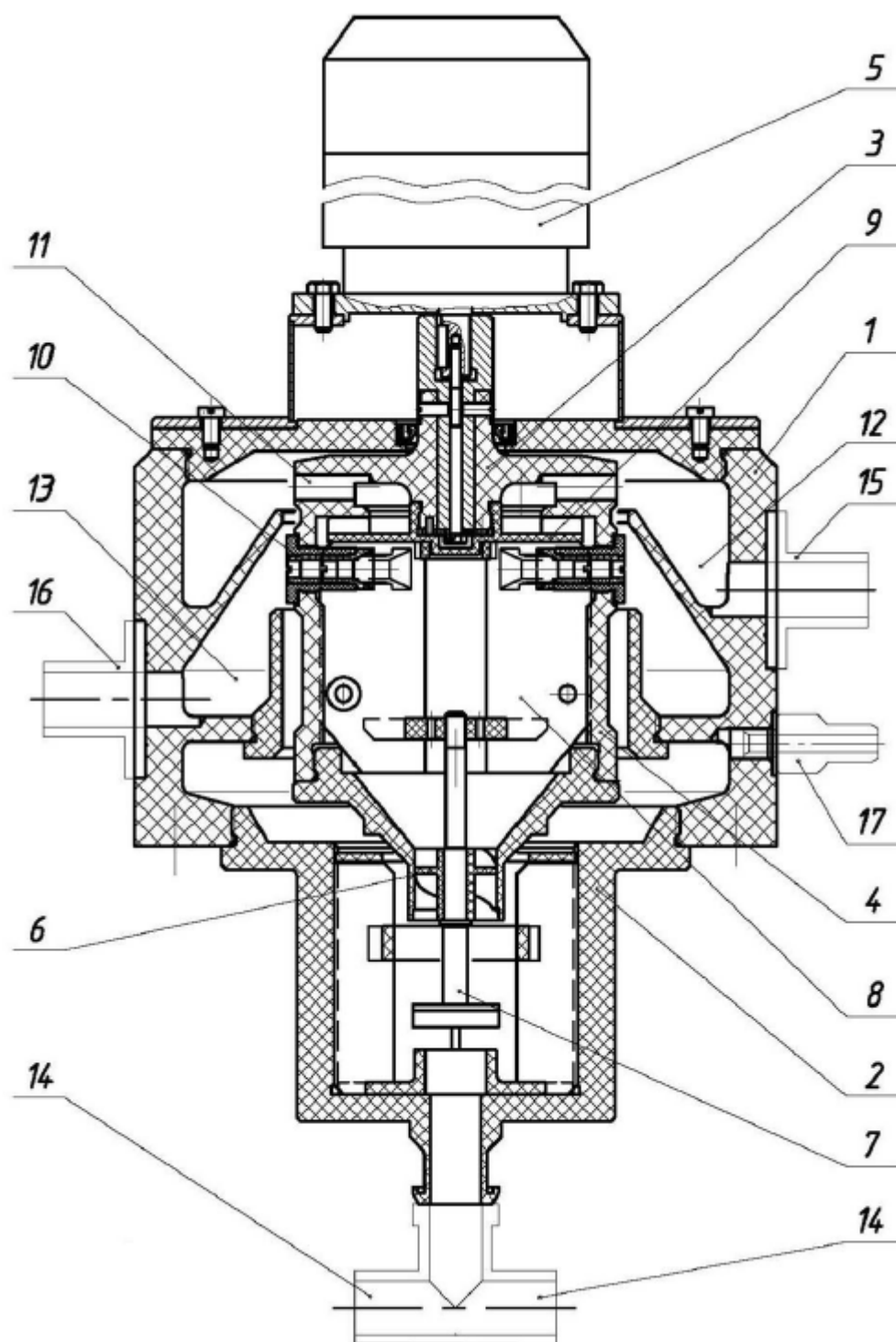


Рисунок 4.17 — Схема установки водной экстракции.

16 - из экстрактора. Длина трубок вывода легкой фазы 10 определяет положение радиуса поверхности раздела фаз r в камере разделения 4. Для настройки экстрактора на различные по плотности технологические растворы конструкция трубок вывода легкой фазы 10 позволяет изменять их длину при помощи резьбового соединения труба в трубе.

Качество разделения двухфазной системы растворов зависит, в первую очередь, от радиуса r положения поверхности раздела фаз (ПРФ) в камере разделения. Радиус r , в первом приближении, зависит от плотностей разделяемой двухфазной системы растворов, типа образовавшейся эмульсии в камере разделения (дисперсная легкая фаза в сплошной тяжелой фазе – эмульсия типа Л/Т, или дисперсная тяжелая фаза в сплошной легкой фазе – эмульсия типа Т/Л), а также от радиусов переливного порога тяжелой r и легкой r фаз. Для регулирования положения ПРФ в камере разделения (роторе), а, следовательно, и качества разделения, служат резьбовые трубки 10 для вывода легкой фазы из ротора. В состоянии поставки трубки вкручены до упора, что соответствует радиусу переливного порога легкой фазы $r = 22$ мм. Радиус переливного порога лёгкой фазы r можно выставить по глубине L вкручивания резьбовых трубок 1 (рисунок 4.18). При увеличении r ПРФ смещается к центру камеры разделения, при уменьшении – к периферии. Вращение трубок осуществляется специальным ключом, входящим в комплект поставки. Радиус переливного порога тяжелой фазы r - постоянный ($r = 42$ мм).

Радиус r в камере разделения, с некоторыми допущениями, можно рассчитывать по формуле:

$$r = \sqrt{\frac{r^2 - r^2(1 - \frac{\rho}{\rho})}{\frac{\rho}{\rho}}}, ,$$

где $\frac{\rho}{\rho}$ - отношение плотностей легкой и тяжелой фаз. Для типа эмульсии Л/Т $r = (0.85-0.95)r$; для типа эмульсии Т/Л $r = (0.7-0.8)r$, где r - максимальный радиус камеры разделения. На данный момент происходит калибровка системы водной экстракции, насосов для точной подачи жидкостей.

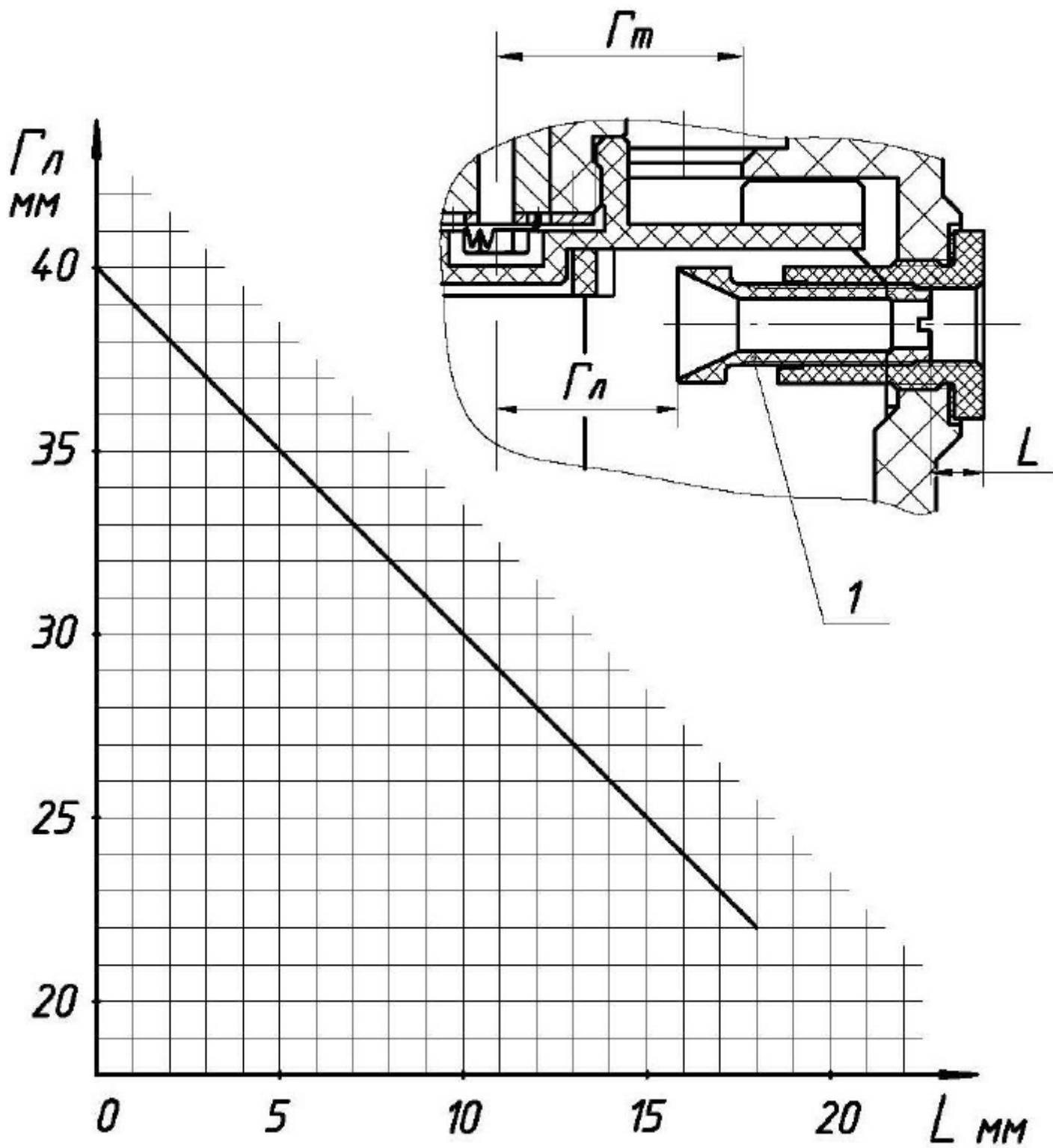


Рисунок 4.18 — Зависимость радиуса переливного порога легкой фазы от глубины вкручивания резьбовой трубки.

4.4.2 Оптическая спектрометрия на индуктивно-связанной плазме

Оптическая спектрометрия на индуктивно-связанной плазме - это аналитический метод, разновидность эмиссионной спектроскопии, в которой индуктивно-связанная плазма используется для возбуждения атомов и ионов, испускающих электромагнитное излучение на длинах волн, характерных для конкретного элемента. Плазма представляет собой высокотемпературный источник ионизированного газа (чаще всего - аргона). Она поддерживается и стабилизируется за счет индуктивной связи с электрическими катушками, работающими на мегагерцевых частотах. Интенсивность излучения на различных длинах волн пропорциональна концентрациям элементов.

Установка для проведения ICP-OES состоит из двух основных частей: плазменной горелки и оптического спектрометра. Плазменная горелка состоит из трех концентрических трубок, выполненных из кварцевого стекла. Внешняя трубка создает поток основного газа, создающего и поддерживающего плазму. Через среднюю трубку поступает вспомогательный газ, который поднимает плазму, предотвращая ее контакт с трубками и предохраняя внутреннюю трубку от расплавления и загрязнения. По внутренней трубке поступает образец в виде аэрозоля и из трубки направляется на плазму. Радиочастотный индуктор, расположенный вокруг верхней части горелки, соединён с РЧ-генератором. Типичная частота работы генератора составляет 27 или 40 МГц. Поток аргона, проходящий через горелку, зажигается с помощью трансформатора Тесла, создающего кратковременную дуговую разрядку для инициации процесса ионизации. После "зажигания" плазмы устройство Тесла отключается. Аргон ионизируется в интенсивном электромагнитном поле и движется по осесимметричной траектории по направлению к магнитному полю РЧ-катушки. В результате неупругих столкновений между нейтральными атомами аргона и заряженными частицами формируется стабильная плазма с температурой в диапазоне от 6000 до 10000 К. Перистальтический насос подаёт водный или органический образец в аналитический распылитель, где он превращается в аэрозоль и напрямую вводится в пламенную зону плазмы. Образец сразу же сталкивается с электронами и заряженными ионами в плазме и распадается на ионы. Молекулы фрагментируются на составляющие атомы, которые теряют электроны и рекомбинируют в плазме, испуская электромагнитное излучение

на длинах волн, характерных для соответствующих элементов. В некоторых конструкциях используется дополнительный газ - обычно азот или сухой сжатый воздух - чтобы «обрезать» плазму в определённой точке. Затем один или два оптических элемента (линзы) направляют испускаемое излучение на дифракционную решётку, где оно разделяется на составляющие длины волн в оптическом спектрометре. В других конструкциях плазма непосредственно направлена на оптический интерфейс, представляющий собой отверстие, из которого непрерывно выходит поток аргона. Этот поток отклоняет плазму и одновременно охлаждает её, позволяя излучению входить в оптическую камеру. В некоторых системах используется оптоволокно, передающее часть излучения в отдельные оптические камеры. Внутри оптической камеры после разделения света на разные длины волн его интенсивность измеряется с помощью фотоэлектронных умножителей, которые физически расположены таким образом, чтобы наблюдать определённые длины волн для каждого элементного сигнала. В более современных приборах разделённый свет падает на поверхность полупроводниковых фотодетекторов. Такие детекторы позволяют одновременно измерять интенсивность всех длин волн в пределах диапазона системы, что даёт возможность анализировать все чувствительные элементы одновременно. Затем интенсивность каждой спектральной линии сравнивается с заранее измеренными значениями для известных концентраций элементов, и их содержание в образце рассчитывается методом интерполяции по калибровочной кривой. Кроме того, специальное программное обеспечение обычно корректирует помехи, вызванные присутствием других элементов в матрице образца.

4.5 Сцинтилляционные свойства смесей линейного алкилбензола и додекана

Свойства жидкого сцинтиллятора имеют принципиальное значение для характеристик детектора. В ряде случаев возникает необходимость корректировать такие параметры, как световыход, число протонов, длина ослабления света или плотность, чтобы оптимизировать сцинтиллятор для конкретной задачи. Одним из распространённых способов изменения этих свойств является разбавление сцинтиллятора минеральным маслом. При этом изменяется также

соотношение углерода и водорода, а следовательно, и количество потенциальных протонов-мишеней для реакции обратного бета-распада. Смеси на основе п-додекана могут быть подходящим выбором для прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа. Выбор состава сцинтиллятора является одной из ключевых задач при проектировании детектора, поскольку требует поиска компромисса между несколькими конкурирующими характеристиками. Для многоцелевого детектора, такого как Баксанский большой нейтринный телескоп, особенно важны два параметра:

1. Высокий световыход, необходимый для достижения высокого энергетического разрешения.
2. Быстрая кинетика сцинтилляционного свечения, обеспечивающая высокое временное разрешение.

Кроме того, длина ослабления света в сцинтилляторе непосредственно влияет на однородность энергетического разрешения по объёму детектора и определяет возможность масштабирования установки до больших размеров.

4.5.1 Спектры излучения и поглощения

Образцы сцинтиллятора заливали в кварцевую кювету диаметром 20 мм и толщиной 10 мм и возбуждали ультрафиолетовым светодиодом с длиной волны 280 нм. Эта длина волны была выбрана таким образом, чтобы соответствовать максимуму спектра поглощения РРО (обычно 290–300 нм в ароматических растворителях), обеспечивая тем самым его прямое и эффективное возбуждение. Спектры излучения регистрировали с помощью спектрометра S100 производства компании Solar Laser System. Измеренные спектры излучения РРО представлены на рисунке 4.19. Как видно, РРО излучает свет в диапазоне длин волн 340–450 нм. Идентичная форма спектров подтверждает, что спектральные характеристики излучения РРО не зависят от используемого растворителя. Следовательно, для всех промежуточных смесей ЛАБ и п-додекана ожидается одинаковый спектр излучения РРО, тогда как основным изменяющимся параметром является интенсивность свечения (световыход). Были приготовлены образцы с различным соотношением минерального масла и ЛАБ без добавления РРО, после чего измерены их спектры поглощения. Для

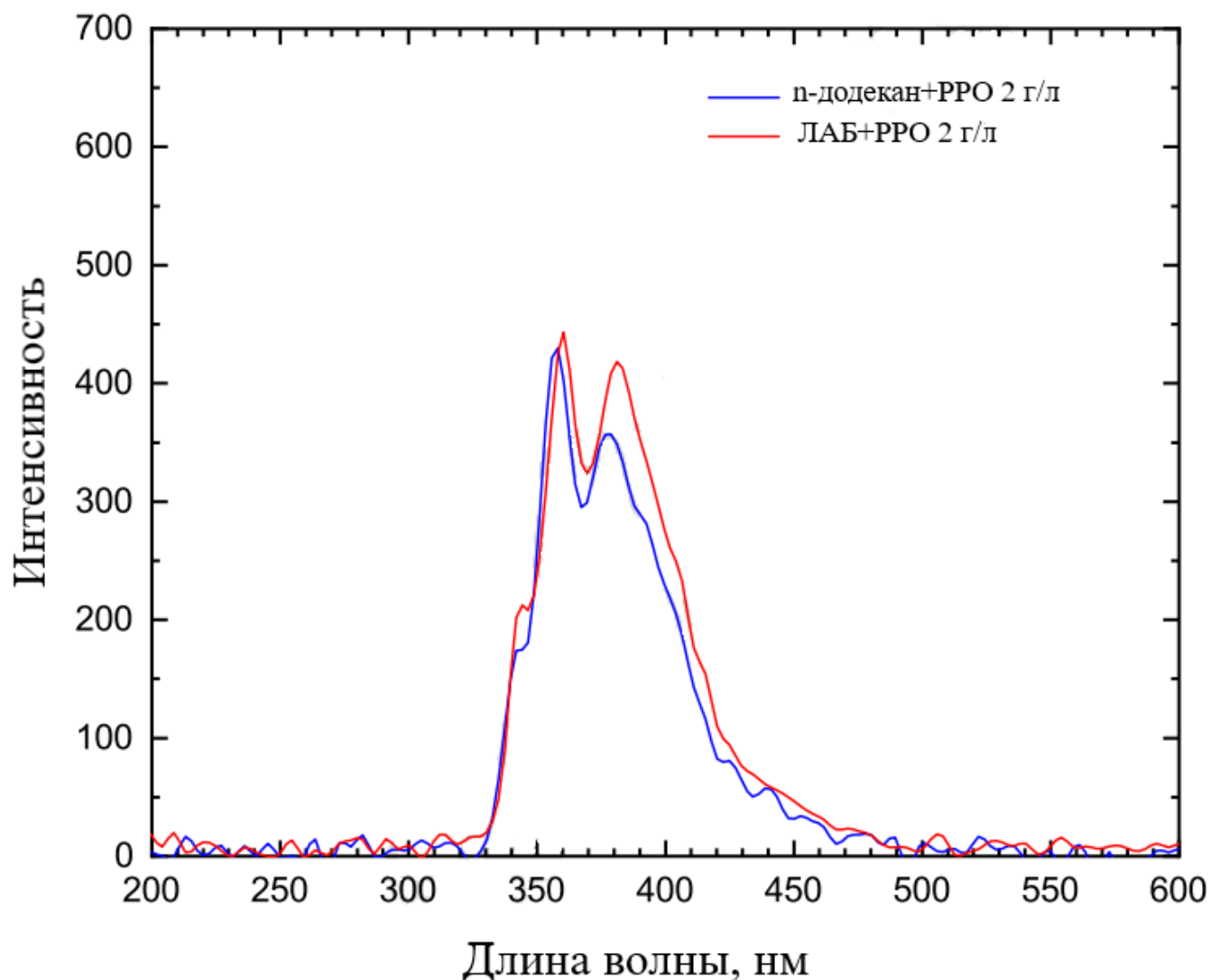


Рисунок 4.19 — Спектры излучения РРО, растворенного в чистом ЛАБ (красный) и чистом n-додекане (синий), при возбуждении с помощью УФ-светодиода с длиной волны 280 нм

этого смеси ЛАБ и n-додекана помещали в кварцевую кювету размером 10 × 10 мм и исследовали с использованием спектрофотометра СФ-56. Спектры поглощения полученных смесей представлены на рисунке 4.20. Измерения проводились на смесях растворителей без добавления РРО, чтобы выделить и охарактеризовать собственные спектры поглощения и длину ослабления света самой смеси растворителей. Эти характеристики являются одним из ключевых факторов, определяющих длину ослабления света в жидких сцинтилляторах.

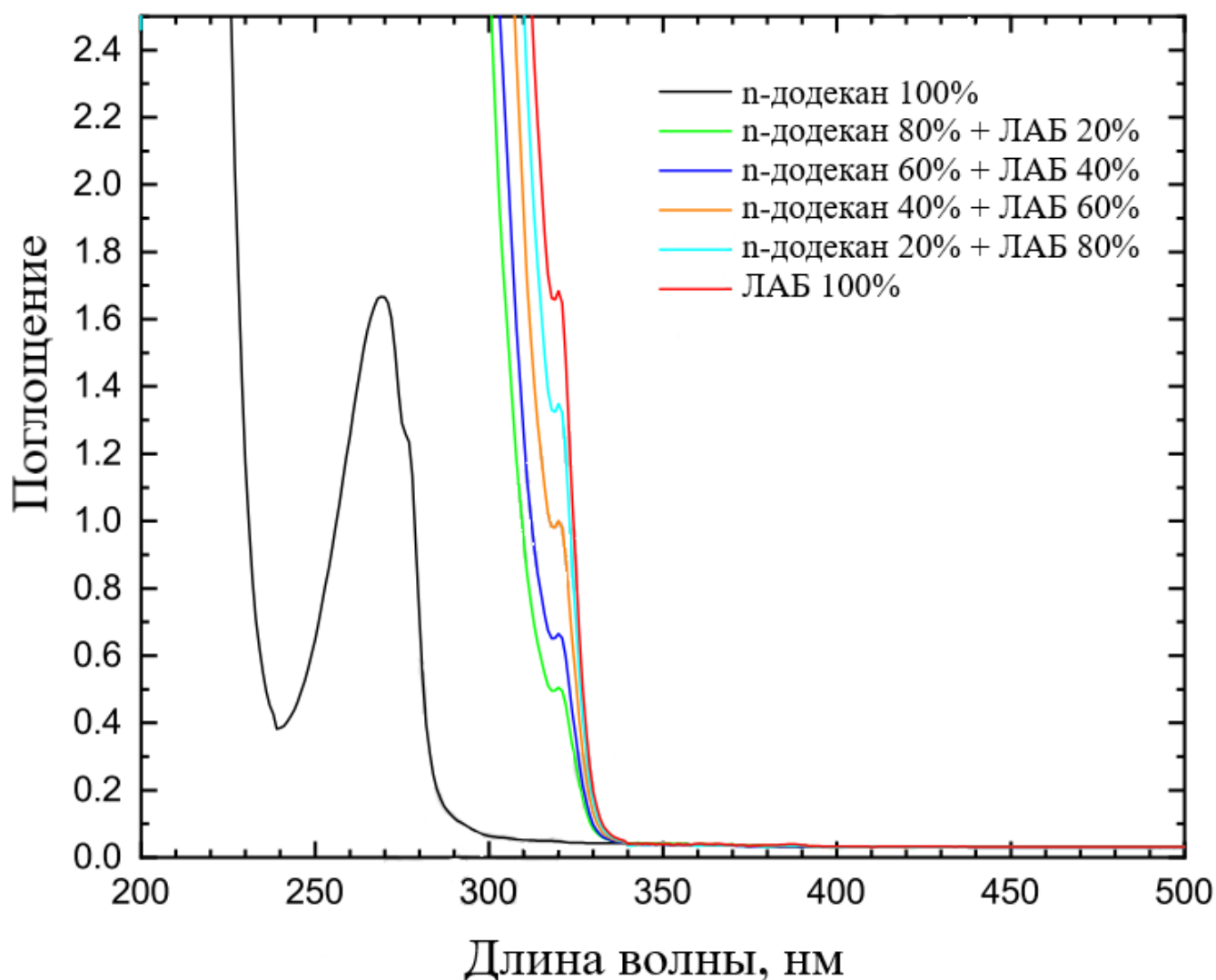


Рисунок 4.20 — Спектры поглощения сцинтилляторов в зависимости от соотношения ЛАБ и n-додекана в смеси

4.5.2 Световыход

Для измерения световыхода образец сцинтиллятора заливали в цилиндрическую кварцевую кювету диаметром 20 мм и толщиной 10 мм. Кювету оборачивали белой тефлоновой лентой для повышения эффективности сбора фотонов на фотокатоде фотоумножителя, после чего облучали γ -квантами с энергией 662 кэВ от радиоактивного источника ^{137}Cs . Зарядовые энергетические спектры регистрировали с помощью 3-дюймового фотоумножителя XP5301В производства Photonis SAS, а сигналы с ФЭУ регистрировали с использованием многоканального цифрового анализатора формы импульсов CAEN N6730. Формы импульсов интегрировали в течение временного окна

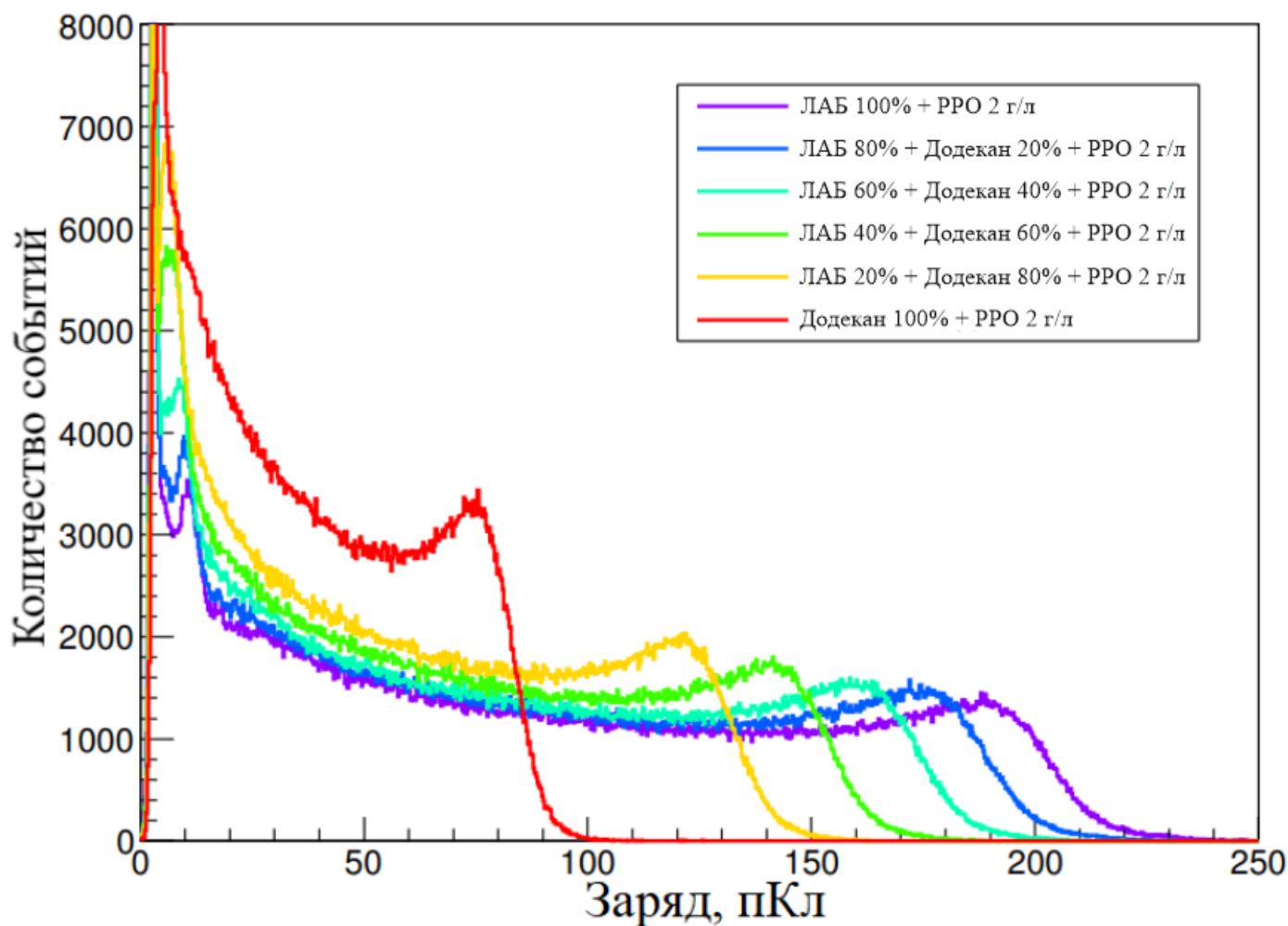


Рисунок 4.21 — Зарядовые спектры сцинтилляторов с различными соотношениями ЛАБ и п-додекана при фиксированной концентрации РРО 2 г/л

продолжительностью 100 нс, что обеспечивало регистрацию полного сцинтилляционного сигнала. Длительность окна более чем в пять раз превышает максимальную постоянную времени затухания ($t=20$ нс), благодаря чему регистрируется более 99% сцинтилляционного света [121]. Зарядовые спектры сцинтилляционных смесей с различным соотношением ЛАБ и п-додекана при концентрации РРО 2 г/л представлены на рисунке 4.21. Световыход исследуемых смесей определяли по положению комптоновского края в зарядовых энергетических спектрах. Положение комптоновского края находили путём аппроксимации спектров с использованием эмпирической функции. Световыход каждого образца оценивали относительно эталонного сцинтиллятора, состоящего из 100% ЛАБ с добавлением РРО в концентрации 2 г/л. Зависимость световыхода от соотношения ЛАБ и п-додекана в смеси приведена на рисунке 4.22. Как видно, световыход сцинтиллятора, содержащего 100% п-додекана,

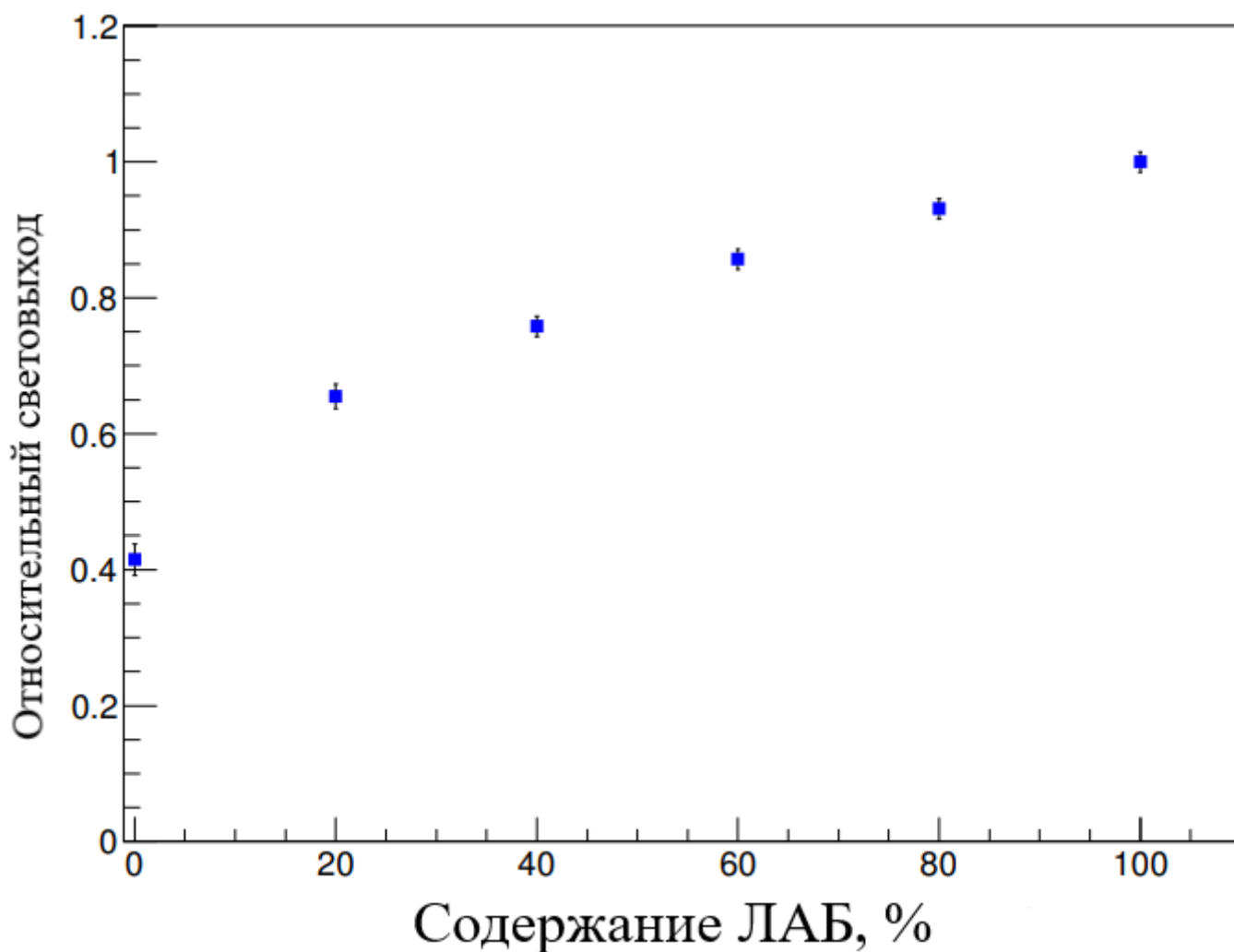


Рисунок 4.22 — Зависимость световыхода от содержания ЛАБ и п-додекана при концентрации РРО 2 г/л

составляет примерно 40% световыхода сцинтиллятора на основе 100% ЛАБ. Этот результат сопоставим с характеристиками сцинтилляторов на основе минеральных масел, успешно применявшихся в нейтринных экспериментах KamLAND и LSND, что свидетельствует о достаточности такого уровня световыхода для регистрации частиц и восстановления их энергии. Дополнительно была исследована зависимость световыхода сцинтиллятора на основе п-додекана от концентрации РРО. На рисунке 4.23 представлены измеренные зарядовые спектры сцинтилляторов на основе п-додекана с различным содержанием РРО при облучении γ -квантами от источника ^{137}Cs . На основании этих измерений была получена зависимость световыхода сцинтиллятора на основе п-додекана от концентрации РРО, представленная на рисунке 4.24. Значения световыхода были нормированы на световыход сцинтиллятора на основе ЛАБ, содержащего 2 г/л РРО. Из полученных результатов следует, что при увеличении концен-

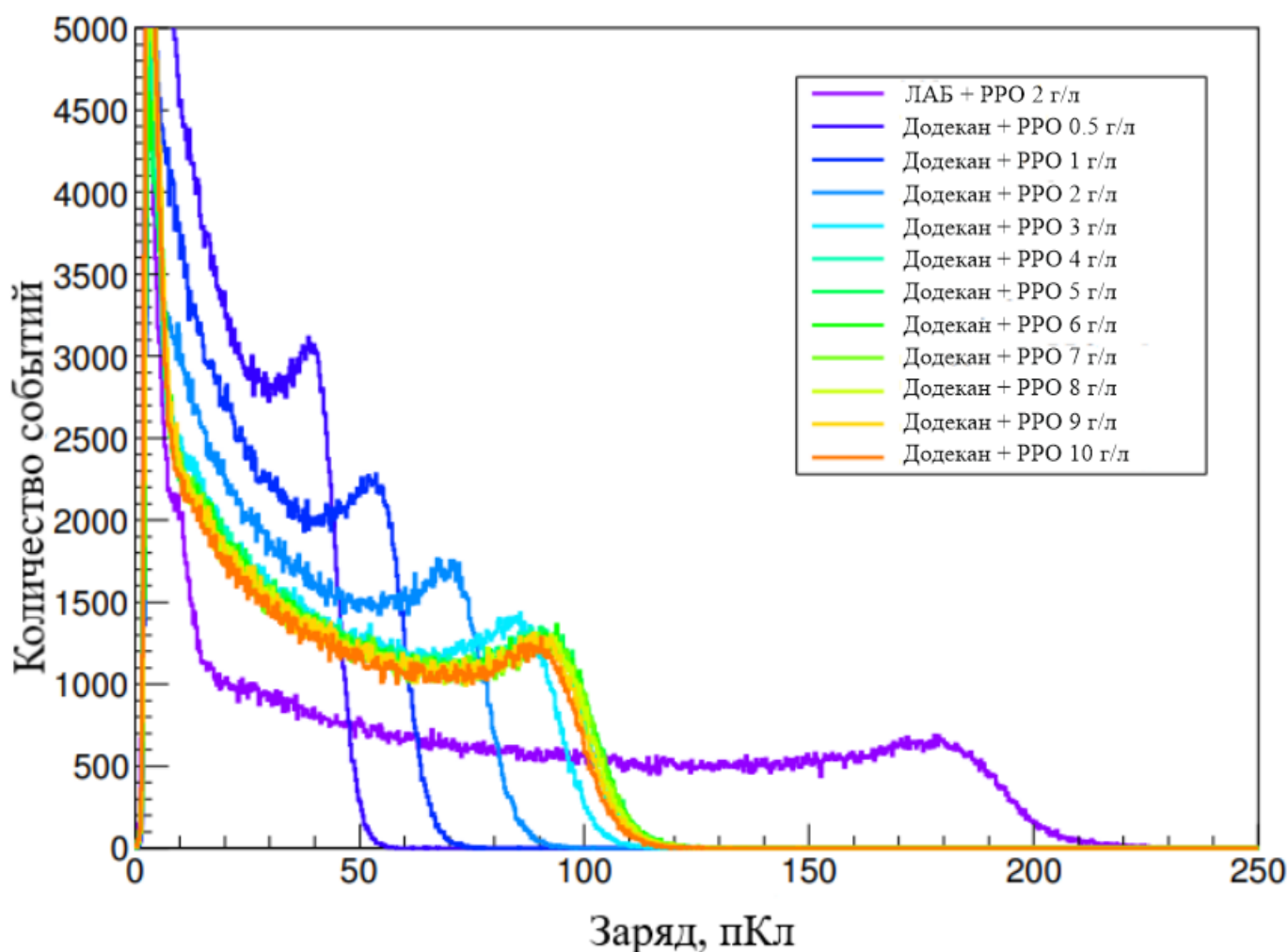


Рисунок 4.23 — Зарядовые спектры n-додекана при разной концентрации РРО

трации РРО световыход возрастает, однако начиная с концентрации около 5 г/л дальнейшее увеличение содержания сцинтилляционной добавки практически не приводит к его росту. Таким образом, при концентрации РРО порядка 5 г/л наблюдается насыщение световыхода сцинтиллятора.

4.5.3 Кинетика свечения

Кинетика свечения измерялась методом счета коррелированных во времени фотонов (Time-Correlated Single Photon Counting, TCSPC)[122; 123]. Измерения проводились на измерительном стенде, подробно описанном в работе [124] Постоянные времени затухания определялись путем аппроксимации

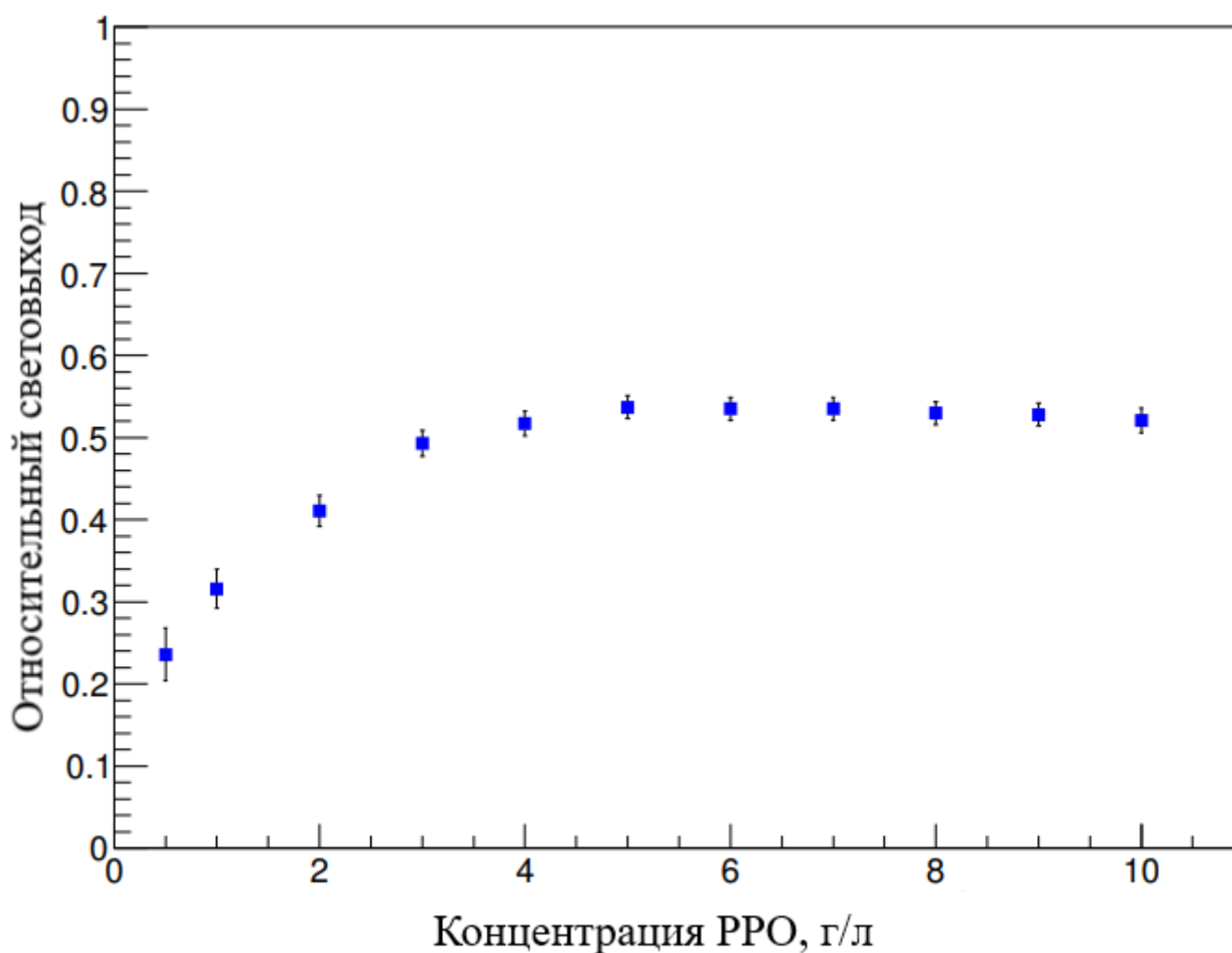


Рисунок 4.24 — Зависимость световыхода от разной концентрации РРО в п-додекане

экспериментальных данных двухэкспоненциальной функцией:

$$y = A_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) + y_0,$$

где τ_1 и τ_2 — постоянные времени затухания, а A_1 и A_2 характеризуют вклад соответствующих компонент в общий световой выход. Для сравнительного анализа все гистограммы формы импульсов были нормированы по максимальной амплитуде, чтобы сосредоточить внимание на различиях во временах затухания между исследуемыми образцами сцинтилляторов. Гистограммы формы импульсов смесей п-додекана и ЛАБ при облучении гамма-квантами от источника ^{137}Cs представлены на рисунке 4.25. Полученные постоянные времени затухания и соответствующие вклады компонент для смесей п-додекана и ЛАБ приведены в таблице 19. Как видно, формы импульсов смесей, содержащих ароматическую составляющую, практически совпадают, тогда как для образца,

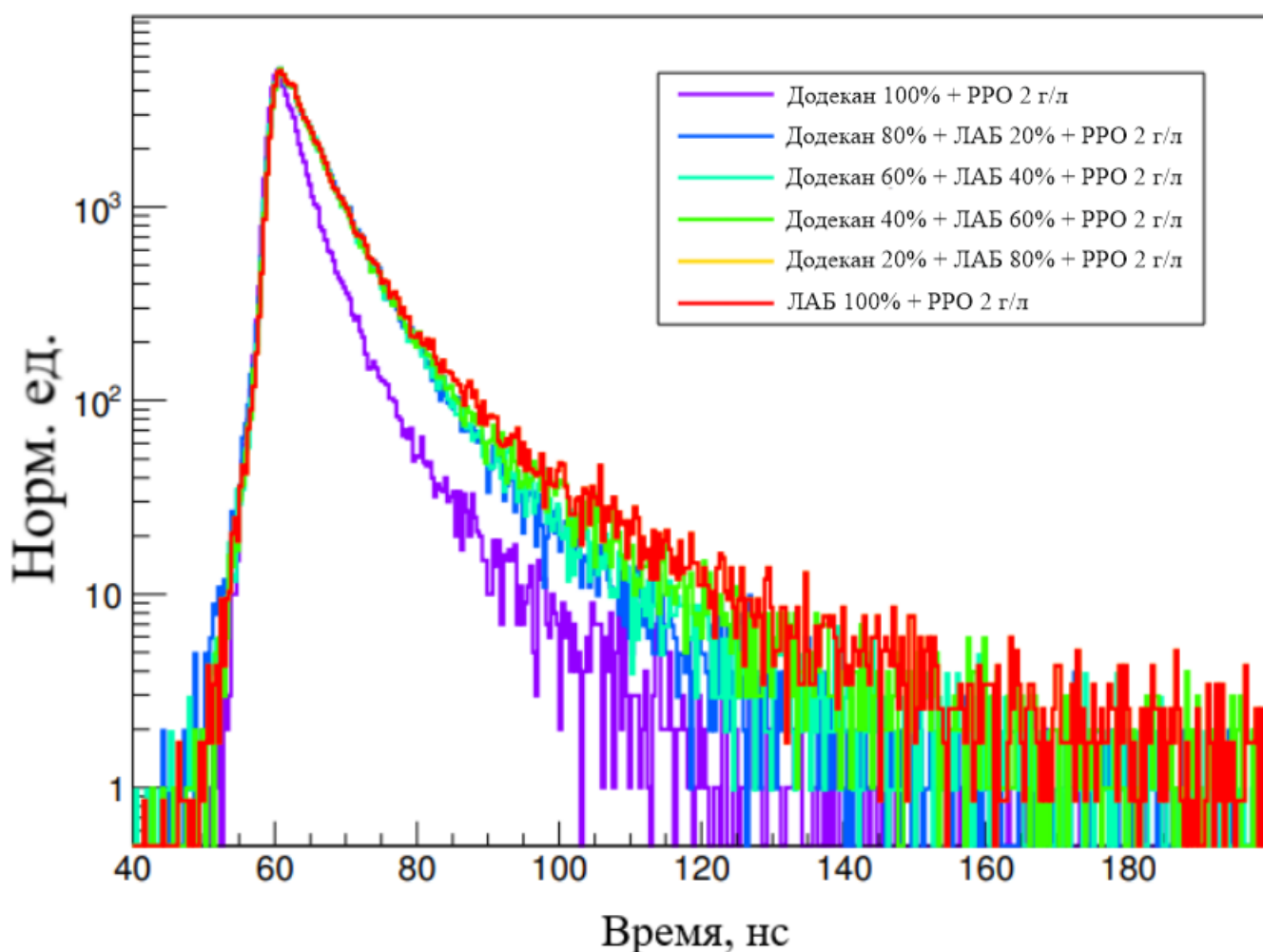


Рисунок 4.25 — Кинетика сцинтилляционного свечения смесей с различными соотношениями ЛАБ и п-додекана при фиксированной концентрации РРО 2 г/л

состоящего из 100% п-додекана, наблюдается заметное отличие. Время затухания сцинтиллятора на основе п-додекана меньше, чем у смесей, содержащих ЛАБ. Как показано в таблице, значение быстрой компоненты существенно изменяется уже при небольшом добавлении ЛАБ (например, с 3.00 нс для 0% ЛАБ до 5.33 нс для 20% ЛАБ), после чего остается практически постоянным при дальнейшем увеличении доли ЛАБ. Такое начальное изменение, вероятно, связано с появлением эффективного механизма резонансного переноса энергии Ферстера (FRET) от ароматического растворителя ЛАБ к флуоресцентной добавке РРО [125]. Этот механизм характеризуется более длительным временем переноса энергии и последующего затухания по сравнению с механизмом прямого возбуждения, который преобладает в чистом п-додекане.

Количество ЛАБ в смеси (%)	τ_1 (нс)	τ_2 (нс)
0	3.00 ± 0.05 (80.6%)	10.41 ± 0.36 (19.2%)
20	5.33 ± 0.05 (90.6%)	17.21 ± 0.78 (9.1%)
40	5.15 ± 0.02 (88.2%)	17.09 ± 0.55 (11.4%)
60	4.96 ± 0.05 (84.1%)	17.62 ± 0.56 (15.4%)
80	5.01 ± 0.04 (81.5%)	18.25 ± 0.45 (17.8%)
100	4.85 ± 0.03 (77.7%)	19.79 ± 0.39 (21.4%)

Таблица 19 — Постоянные времени затухания и соответствующие вклады компонент для смесей п-додекана и ЛАБ

Гистограммы формы импульсов сцинтилляторов на основе п-додекана при облучении гамма-квантами от источника ^{137}Cs представлены на рисунке 4.26. Полученные постоянные времени затухания и соответствующие вклады компонент для сцинтилляторов на основе п-додекана с различной концентрацией РРО приведены в таблице 20. Как видно, время затухания

PPO concentration (g/L)	τ_1 (ns)	τ_2 (ns)
2	3.00 ± 0.05 (80.6%)	10.41 ± 0.36 (19.2%)
4	2.52 ± 0.03 (70.7%)	9.74 ± 0.25 (29.0%)
6	2.26 ± 0.05 (62.8%)	9.59 ± 0.15 (37.0%)
8	2.04 ± 0.02 (55.1%)	9.35 ± 0.11 (44.5%)
10	1.97 ± 0.02 (50.8%)	9.70 ± 0.12 (48.9%)

Таблица 20 — Постоянные времени затухания и соответствующие вклады компонент для сцинтилляторов на основе п-додекана с различной концентрацией РРО.

лишь незначительно зависит от концентрации флуоресцентной добавки. При использовании п-додекана в качестве растворителя быстрая компонента сцинтилляционного свечения практически не зависит от концентрации РРО. Этот результат согласуется с данными предыдущих исследований. При увеличении концентрации РРО возрастает вероятность межмолекулярного взаимодействия между возбужденными молекулами РРО. В частности, более вероятным становится процесс триплет-триплетной аннигиляции (Triplet-Triplet Annihilation, ТТА) [126; 127], который приводит к возникновению задержанной флуоресценции и, как следствие, к небольшому увеличению относительной амплитуды медленной компоненты сцинтилляционного свечения.

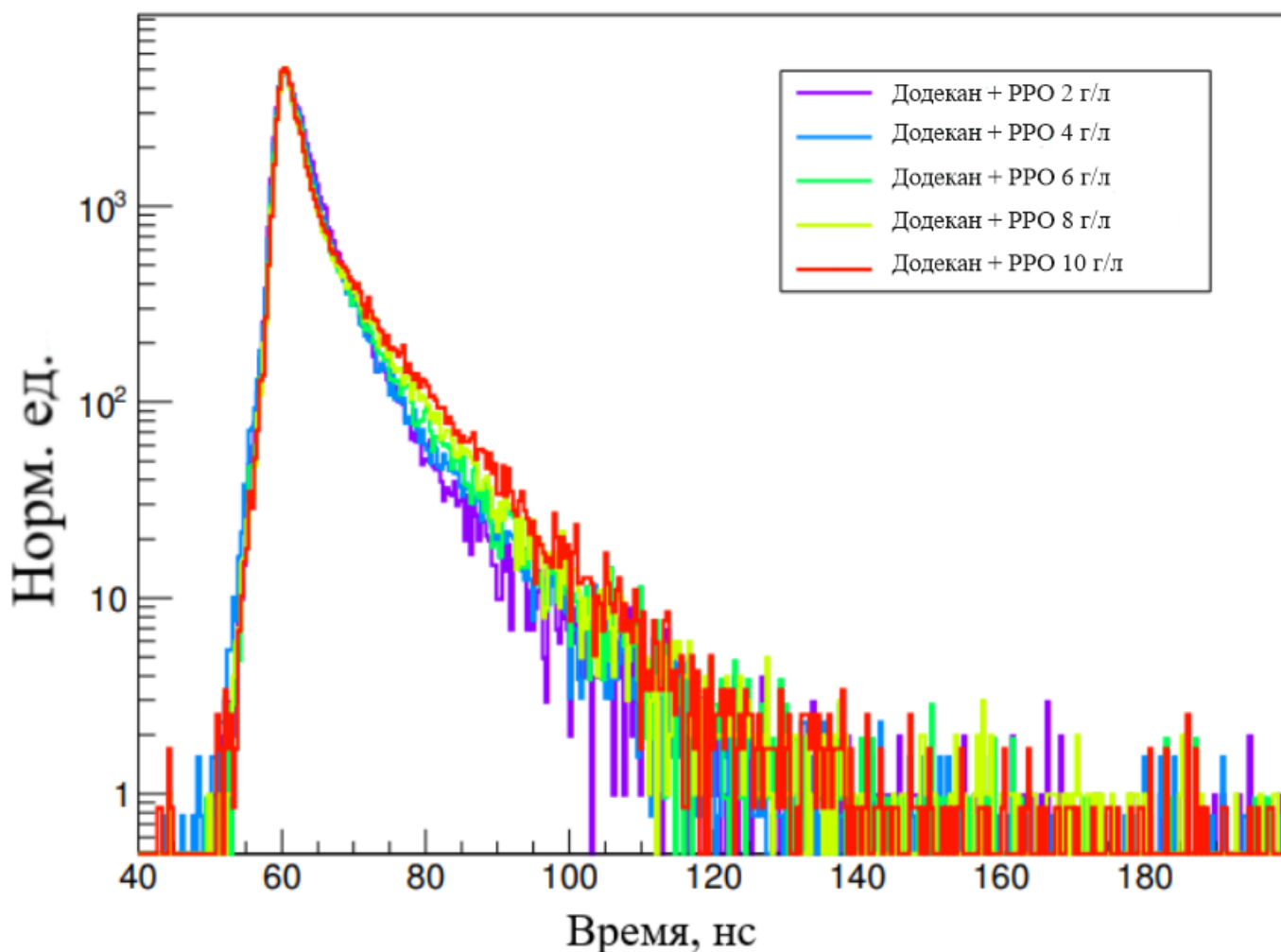


Рисунок 4.26 — Кинетика сцинтилляционного свечения n-додекана при разной концентрации РРО

4.6 Заключение к главе 4

В данной главе были рассмотрены разработанные для 5-тонного прототипа ББНТ системы очистки жидкого сцинтиллятора, а также разработаны методики очистки. По результатам измерений коэффициента поглощения вакуумная дистилляция позволяет достичь хорошей степени очистки, особенно в первых порциях, длина ослабления света составляет 9 м. При этом последние порции растворителя также имеют длину ослабления большую, чем исходный образец. По результатам разработки методики хроматографической очистки можно сделать вывод, что качество очистки ЛАБ зависит не только от адсорбента, но и от чистоты исходного растворителя. Чем выше длина ослабления света исходного ЛАБ, тем больше объема можно очистить с помощью одного объема

оксида алюминия. При этом при соотношении очищаемого ЛАБ к оксиду алюминия 10:1 длина ослабления всегда выше, чем у исходного продукта. Также адсорбент необходимо подвергать отжигу для удаления из него излишней влаги, а также других компонентов, которые могут ухудшать адсорбционные свойства оксида алюминия. Разработанные установки хроматографической очистки и вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции обладают высокой производительностью до 200 л/ч и позволят очистить ЛАБ до требуемых характеристик [П.2, П.6]. Исследованы жидкие сцинтилляторы на основе смесей линейного алкилбензола с n-додеканом. Данные смеси являются перспективными для использования в детекторах нового поколения [П.3, П.5, П.9, П.10].

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Разработана и создана система компенсации магнитного поля для прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа с массой мишени 5 тонн. Была получена оптимальная конфигурация системы колец Гельмгольца для компенсации вертикальной и горизонтальной компонент магнитного поля, были рассчитаны оптимальные параметры системы компенсации. Значения магнитного поля в месте расположения детектора снижено с 0.3 Гс до 0.03 Гс.
2. Разработан и создан измерительный стенд на основе катушек Гельмгольца для исследования влияния магнитного поля на параметры фотоэлектронных умножителей. Разработанный измерительный стенд позволяет компенсировать магнитное поле в трех направлениях, а также создавать дополнительное магнитное поле до 1 Гс.
3. Исследовано влияние естественного магнитного поля на параметры фотоумножителей, а также влияние искусственно создаваемого поля вдоль каждой оси ФЭУ. Компенсация магнитного поля позволяет снизить изменение коэффициента усиления с 22% до 1%.
4. Разработана и создана система хроматографической очистки, система вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции, система водной экстракции, предназначенные для очистки линейного алкилбензола.
5. Разработана методика очистки линейного алкилбензола для повышения оптических свойств и удаления радиоактивных примесей. Методика позволяет повысить прозрачность ЛАБ с 1.5 м до более 10 м.
6. Исследованы жидкие сцинтилляторы на основе смесей линейного алкилбензола с п-додеканом. Показано перспективность использования таких смесей, обладающих приемлемым световыходом и высокой прозрачностью. Для жидкого сцинтиллятора на основе только п-додекана получен световыход 4000-5000 фотонов на 1 МэВ

Полученные в работе результаты могут быть использованы при последующей разработке инфраструктуры крупномасштабного Баксанского большого ней-

тринного телескопа, а также при создании систем компенсации магнитного поля и системы очистки жидкого сцинтиллятора для экспериментов следующего поколения.

Список литературы

1. The design and sensitivity of JUNO's scintillator radiopurity pre-detector OSIRIS / A. Abusleme [et al.] // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Vol. 81, no. 11. — P. 973. — URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09544-4>.
2. Characterization of large-area photomultipliers under low magnetic fields: Design and performance of the magnetic shielding for the Double Chooz neutrino experiment / E. Calvo [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2010. — Vol. 621, no. 1. — P. 222—230. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890021001199X>.
3. The design of the optical modules of the KM3NeT-Italia project towers / E. Leonora, S. Aiello, [et al.] // EPJ Web of Conferences. — 2016. — Jan. — Vol. 121. — P. 05016.
4. The effects of Earth's magnetic field on 3-inch diameter photomultipliers used in KM3NeT neutrino telescope / V. Giordano, S. Aiello, [et al.] // EPJ Web of Conferences. — 2016. — Jan. — Vol. 116. — P. 01005.
5. The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems / M. G. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2017. — Mar. — Vol. 12, no. 03. — P03012. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/P03012>.
6. *Ghazikhanian, V.* μ -Metal Wire Magnetic Shields for Large PMTs : Technical Note / V. Ghazikhanian, K. T. McDonald ; Princeton University. — 02/2007. — URL: <https://kirkmcd.princeton.edu/dayabay/shield.pdf>.
7. Passive magnetic cylindrical shielding at gauss-range static fields / E. Calvo [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 600, no. 3. — P. 560—567. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900208021219>.

8. The measurements of 2200 ETL9351 type photomultipliers for the Borexino experiment with the photomultiplier testing facility at LNGS / A. Ianni, P. Lombardi, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2005. — Vol. 537, no. 3. — P. 683—697. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900204018078>.
9. Electromagnetic design of the large-volume air coil system of the KATRIN experiment / F. Gluck [et al.] // New Journal of Physics. — 2013. — Aug. — Vol. 15, no. 8. — P. 083025. — URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/8/083025>.
10. The Earth's magnetic field compensation in the Borexino phototubes facility : Technical Report / G. Bacchiocchi, A. Brigatti, R. Dossi, [et al.] ; Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. — 11/1997. — 15 p. — INFN/TC—97/35.
11. Measurement of neutrino oscillation by the K2K experiment / M. H. Ahn, E. Aliu, S. Andringa, [et al.] // Phys. Rev. D. — 2006. — Oct. — Vol. 74, issue 7. — P. 072003. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.74.072003>.
12. The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso / G. Alimonti, C. Arpesella, H. Back, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 600, no. 3. — P. 568—593. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890020801601X>.
13. *Anfimov, N.* Large photocathode 20-inch PMT testing methods for the JUNO experiment / N. Anfimov // Journal of Instrumentation. — 2017. — June. — Vol. 12, no. 06. — P. C06017. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/06/C06017>.
14. Light attenuation length of high quality linear alkyl benzene as liquid scintillator solvent for the JUNO experiment / H. Yang [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2017. — Nov. — Vol. 12, no. 11. — T11004. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/11/T11004>.

15. Light absorption properties of the high quality linear alkylbenzene for the JUNO experiment / D. Cao [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — Vol. 927. — P. 230—235. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900219301391>.
16. Some new progress on the light absorption properties of linear alkyl benzene solvent* / G.-Y. Yu [et al.] // Chinese Physics C. — 2016. — Jan. — Vol. 40, no. 1. — P. 016002. — URL: <https://doi.org/10.1088/1674-1137/40/1/016002>.
17. Study of attenuation length of linear alkyl benzene as LS solvent / P. Huang, P. Li, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2010. — Aug. — Vol. 5, no. 08. — P08007. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/5/08/P08007>.
18. Theoretical study of UV-Vis light absorption of some impurities in alkylbenzene type liquid scintillator solvents / P.-W. Huang [et al.] // Theoretical Chemistry Accounts. — 2011. — May. — Vol. 129. — P. 229—234.
19. *Super-Kamiokande collaboration*. History of Kamiokande experiment / Super-Kamiokande collaboration. — 2025. — URL: <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/sk/about/history/>.
20. Observation in the Kamiokande-II Detector of the Neutrino Burst from Supernova SN 1987a / K. S. Hirata, T. Kajita, M. Koshiba, [et al.] // Phys. Rev. D. — 1988. — Vol. 38, issue 2. — P. 448—458.
21. *Nakahata, M.* History of solar neutrino observations / M. Nakahata // Progress of Theoretical and Experimental Physics. — 2022. — Mar. — Vol. 2022, no. 12. — 12B103.
22. *Suzuki, A.* The start of things for Kamiokande: The Kamioka Nucleon Decay Experiment / A. Suzuki // Progress of Theoretical and Experimental Physics. — 2022. — Vol. 2022, no. 12. — 12B102.
23. Observation of 8B solar neutrinos in the Kamiokande-II detector / K. S. Hirata, T. Kajita, T. Kifune, [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 1989. — July. — Vol. 63, issue 1. — P. 16—19.
24. *Suzuki, Y.* The Super-Kamiokande experiment / Y. Suzuki // The European Physical Journal C. — 2019. — Apr. — Vol. 79. — P. 298.

25. The Super-Kamiokande detector / S. Fukuda, Y. Fukuda, T. Hayakawa, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Vol. 501, no. 2. — P. 418—462.
26. Solar neutrino measurements using the full data period of Super-Kamiokande-IV / K. Abe, C. Bronner, Y. Hayato, [et al.] // Phys. Rev. D. — 2024. — May. — Vol. 109, issue 9. — P. 092001.
27. The Sudbury Neutrino Observatory / A. Bellerive, J. R. Klein, [et al.] // Nuclear Physics B. — 2016. — Apr. — Vol. 908. — P. 30—51.
28. Magnetic field compensation for the SNO Detector : tech. rep. / H. Lee [et al.]. — 06/1990. — No. 82.
29. *Waller, D.* Results from the Sudbury Neutrino Observatory / D. Waller // eConf / ed. by J. Hewett [et al.]. — 2004. — Vol. C040802. — WET001.
30. Overview and accomplishments of the Borexino experiment / G. Ranucci, M. Agostini, G. B. Bellini, [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Feb. — Vol. 675. — P. 012036.
31. A scintillator purification system for the Borexino solar neutrino detector / J. Benziger, L. Cadonati, F. Calaprice, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2008. — Vol. 587, no. 2. — P. 277—291.
32. Magnetic shielding for large photoelectron multipliers for the OSIRIS facility of the JUNO detector / O. Smirnov, D. Korablev, A. Sotnikov, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2023. — Apr. — Vol. 18, no. 04. — P04015. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/04/P04015>.
33. The SNO+ experiment / V. Albanese, R. Alves, M. R. Anderson, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2021. — Aug. — Vol. 16, no. 08. — P08059.
34. Development, characterisation, and deployment of the SNO+ liquid scintillator / M. R. Anderson, S. Andringa, L. Anselmo, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2021. — May. — Vol. 16, no. 05. — P05009.
35. *Ford, R. J.* A Scintillator Purification Plant and Fluid Handling System for SNO+ / R. J. Ford // AIP Conf. Proc. — 2015. — Vol. 1672, no. 1. — P. 080003.

36. SNO+ present status and prospects / S. Andringa [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Jan. — Vol. 1137, no. 1. — P. 012053.
37. Letter of Intent for Double-CHOOZ: a Search for the Mixing Angle θ_{13} / F. Ardellier, I. Barabanov, J. C. Barriere, [et al.]. — 2004. — arXiv: hep-ex/0405032 [hep-ex].
38. The Double Chooz Experiment: A Search for the Mixing Angle θ_{13} / T. A. Mueller [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2011. — Sept. — Vol. 312, no. 7. — P. 072013.
39. Constraint on the matter–antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations / K. Abe, R. Akutsu, A. Ali, [et al.] // Nature. — 2020. — Apr. — Vol. 580. — P. 339—344.
40. Double-Chooz Neutrino Experiment / C. Palomares [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2011. — Dec. — Vol. 335, no. 1. — P. 012055.
41. Search for neutrino oscillations on a long base-line at the CHOOZ nuclear power station / M. Apollonio, A. Baldini, C. Bemporad, [et al.] // Eur. Phys. J. C. — 2003. — Vol. 27. — P. 331—374.
42. The Double Chooz antineutrino detectors / H. de Kerret, Y. Abe, C. Aberle, [et al.] // Eur. Phys. J. C. — 2022. — Vol. 82. — P. 804.
43. Double Chooz θ_{13} measurement via total neutron capture detection / H. de Kerret, T. Abrahao, H. Almazan, [et al.] // Nature Phys. — 2020. — Vol. 16, no. 5. — P. 558—564.
44. Cosmic-muon characterization and annual modulation measurement with Double Chooz detectors / T. Abrahao, H. Almazan, J. C. Anjos, [et al.] // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2017. — Feb. — Vol. 2017, no. 02. — P. 017.
45. A Precision Measurement of the Neutrino Mixing Angle θ_{13} using Reactor Antineutrinos at Daya Bay / X. Guo, N. Wang, R. Wang, [et al.]. — 2007. — Jan. — arXiv: hep-ex/0701029.
46. *Jun, C.* An overview of the Daya Bay reactor neutrino experiment / C. Jun, L. Kam-Biu // Nuclear Physics B. — 2016. — Vol. 908. — P. 62—73. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0550321316300724> ; Neutrino Oscillations: Celebrating the Nobel Prize in Physics 2015.

47. Light-weight flexible magnetic shields for large-aperture photomultiplier tubes / P. DeVore, D. Escontrias, T. Koblesky, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2014. — Vol. 737. — P. 222—228.
48. The design and technology development of the JUNO central detector / A. Abusleme, T. Adam, S. Ahmad, [et al.] // The European Physical Journal Plus. — 2024. — Dec. — Vol. 139. — P. 1128.
49. Optimization of the JUNO liquid scintillator composition using a Daya Bay antineutrino detector / A. Abusleme, T. Adam, S. Ahmad, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2021. — Vol. 988. — P. 164823.
50. JUNO Detector Design and Status / Z. Wang [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Dec. — Vol. 2156, no. 1. — P. 012113.
51. *International Association of Geomagnetism and Aeronomy*. International Geomagnetic Reference Field / International Association of Geomagnetism and Aeronomy. — 2024. — URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>.
52. The study of active geomagnetic shielding coils system for JUNO / G. Zhang, H. Lu, J. Songwadhana, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2021. — Nov. — Vol. 16, no. 10. — T10004.
53. *Narongkiat, R.* Design and Integration of JUNO-OSIRIS / R. Narongkiat, W. Zhimin //. — 2024. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:268379397>.
54. Optical purification pilot plant for JUNO liquid scintillator / Z. Zhihang, S. Lijun, H. Tao, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2023. — Vol. 1048. — P. 167890.
55. Distillation and gas stripping purification plants for the JUNO liquid scintillator / C. Landini, Beretta, P. Lombardi, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2024. — Vol. 1069. — P. 169887.

56. Development of water extraction system for liquid scintillator purification of JUNO / Y. Jiaxuan, F. Jian, Z. Li, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2022. — Vol. 1027. — P. 166251.
57. Letter of Intent: The Hyper-Kamiokande Experiment — Detector Design and Physics Potential — / K. Abe, T. Abe, H. Aihara, [et al.] // Progress of Theoretical and Experimental Physics. — 2015. — Sept. — P. 053C02.
58. Hyper-Kamiokande Design Report / H.-K. Proto-Collaboration [et al.]. — 2018. — arXiv: 1805.04163 [physics.ins-det]. — URL: <https://arxiv.org/abs/1805.04163>.
59. Design of the geomagnetic field compensation system for hyper-Kamiokande / R. C. Sara, J. Maco, M. Sanchez, [et al.] // The European Physical Journal Plus. — 2025. — Vol. 140. — P. 694.
60. *Хмелевской, В. К.* Основы геофизических методов: учебник для ВУЗов / В. К. Хмелевской, К. В. И. — Пермь : Пермский государственный университет, 2010. — 400 с.
61. *Магнитная обсерватория "Москва".* Международное эталонное магнитное поле / Магнитная обсерватория "Москва". — 2019. — URL: <http://serv.izmiran.ru/webff/igrf-13.html>.
62. Three-Axis Digital Compass IC HMC5883L / Honeywell. — 12001 Highway 55 Plymouth, MN 55441, 04/2012.
63. Automatic calibration of magnetic tracking / M. Wang, Q. Luo, Y. Iravantchi, [et al.] // Proceedings of the 28th Annual International Conference on Mobile Computing And Networking. — Sydney, NSW, Australia : Association for Computing Machinery, 2022. — P. 391—404. — URL: <https://doi.org/10.1145/3495243.3558760>.
64. Calibration of Strapdown Magnetometers in Magnetic Field Domain / D. Gebre-Egziabher, G. Elkaim, [et al.] // Journal of Aerospace Engineering - J AEROSP ENG. — 2006. — Apr. — Vol. 19. — P. 87—102.
65. *Wu, Y.* On Calibration of Three-Axis Magnetometer / Y. Wu, W. Shi // Sensors Journal, IEEE. — 2015. — Nov. — Vol. 15. — P. 6424—6431.

66. *Ye, J.* Real-time calibration of magnetometers based on the recursive least squares method / J. Ye, Z. Wu // Journal of Physics: Conference Series. — 2024. — Nov. — Vol. 2897, no. 1. — P. 012028. — URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2897/1/012028>.
67. Geometric Approach to Strapdown Magnetometer Calibration in Sensor Frame / J. Vasconcelos, G. Elkaim, [et al.] // Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on. — 2011. — May. — Vol. 47. — P. 1293—1306.
68. *Batista, D.* Attitude-Independent Magnetometer Calibration including Time-Varying Bias using a Helmholtz Coil powered by a Howland Current Source : PhD thesis / Batista Daniel. — 04/2023.
69. *Arami, A.* Reference-Free Automated Magnetic Sensor Calibration for Angle Estimation in Smart Knee Prostheses / A. Arami, J. Rechenmann, K. Aminian // Sensors Journal, IEEE. — 2014. — June. — Vol. 14. — P. 1788—1796.
70. *Abbott, J. J.* Parametric design of tri-axial nested Helmholtz coils / J. J. Abbott // Review of Scientific Instruments. — 2015. — May. — Vol. 86, no. 5. — P. 054701. — eprint: https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-pdf/doi/10.1063/1.4919400/13362878/054701_1_online.pdf. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4919400>.
71. *Sadiq, U. A.* Optimization Design and Characterization of Helmholtz Coils / U. A. Sadiq, O. W. Oluyombo // Journal of Information Engineering and Applications. — 2019. — Vol. 9, no. 4. — P. 44—50.
72. *Redzic, D. V.* The magnetic field of a static circular current loop: a new derivation / D. V. Redzic // European Journal of Physics. — 2006. — July. — Vol. 27, no. 5. — N9. — URL: <https://doi.org/10.1088/0143-0807/27/5/N01>.
73. *Schill, R. A.* General relation for the vector magnetic field of a circular current loop: A closer look / R. A. Schill // Magnetism, IEEE Transactions on. — 2003. — Apr. — Vol. 39. — P. 961—967.
74. *Barker, J. R.* The Magnetic Field inside a Solenoid / J. R. Barker // British Journal of Applied Physics. — 1950. — Mar. — Vol. 1, no. 3. — P. 65. — URL: <https://doi.org/10.1088/0508-3443/1/3/303>.

75. *Lugansky, L. B.* Optimal coils for producing uniform magnetic fields / L. B. Lugansky // Journal of Physics E: Scientific Instruments. — 1987. — Mar. — Vol. 20, no. 3. — P. 277. — URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3735/20/3/009>.
76. *Garcia-Farieta, J.* Exploring the magnetic field of Helmholtz and Maxwell coils: a computer-based approach exploiting the superposition principle / J. Garcia-Farieta, A. Hurtado // Revista Brasileira de Ensino de Física. — 2020. — Oct. — Vol. 42. — P. 1—8.
77. Efficient calculations of magnetic fields of solenoids for simulations / P. Granum, M. Linnet Madsen, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2022. — Vol. 1034. — P. 166706. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900222002455>.
78. *Andreeva, E.* Mathematical Description of Solution of the Three-Dimensional Boundary Value Problem for the Stationary Magnetic Field in the Cylindrical Coordinate System / E. Andreeva, A. Tatevosyan // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Jan. — Vol. 1441. — P. 012016.
79. Elliptic Helmholtz coil / D. Romero-Abad, J.-P. Reyes-Portales, [et al.] // Revista Brasileira de Ensino de Física. — 2022. — June. — Vol. 44. — P. 1—7.
80. Geomagnetic field effects on the performance of 8-inch dynode photomultiplier tubes / Z.-W. Fu, F. Gao, [et al.] // Frontiers in Physics. — 2023. — June. — Vol. 11. — P. 1160388.
81. *Leonora, E.* Terrestrial magnetic field effects on large photomultipliers / E. Leonora // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2013. — Vol. 725. — P. 148—150. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900212015902>.
82. Cathode position response of large-area photomultipliers under a magnetic field / T. Koblesky, J. Roloff, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2012. — Vol. 670. — P. 40—44. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900211022637>.

83. Evaluation of large area photomultipliers for use in a new Baksan Large Neutrino Telescope project / N. Ushakov, A. Fazliakhmetov, V. Gavrin, [et al.] // Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2021). Vol. 395. — 2021. — P. 1101.
84. ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК. — Министерство энергетики РФ, 2003. — 500 с.
85. *Hoburg, J. F.* Principles of quasistatic magnetic shielding with cylindrical and spherical shields / J. F. Hoburg // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 1995. — Vol. 37, no. 4. — P. 574—579.
86. *Hasselgren, L.* Geometrical aspects of magnetic shielding at extremely low frequencies / L. Hasselgren, J. Luomi // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 1995. — Vol. 37, no. 3. — P. 409—420.
87. *Istenic, M.* On shielding design of extremely low frequency magnetic fields / M. Istenic, P. Kokelj, P. Zunko // Elektrotehniski Vestnik/Electrotechnical Review. — 2004. — Jan. — Vol. 71. — P. 34—39.
88. *Lovat, G.* Electromagnetic Shielding / G. Lovat. — Wiley-IEEE Press, 01.2007. — C. 384.
89. Enhancement of Magnetic Shielding Based on Low-Noise Materials, Magnetization Control, and Active Compensation: A Review / Y. Liu, J. Yang, [et al.] // Materials. — 2024. — Nov. — Vol. 17. — P. 5469.
90. Review of Fe-6.5wt% Si high silicon steel—A promising soft magnetic material for sub-kHz application / O. Gaoyuan, C. Xi, [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2019. — Vol. 481. — P. 234—250. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885318331330>.
91. Evolution and recent developments of 80% Ni permalloys / T. Waeckerle [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2020. — Vol. 505. — P. 166635. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885319327337>.
92. A high-performance compact magnetic shield for optically pumped magnetometer-based magnetoencephalography / K. He, J. Sheng, D. Liu, [et al.] // Review of Scientific Instruments. — 2019. — June. — Vol. 90. — P. 064102.

93. The veto system of the DarkSide-50 experiment / P. Agnes, L. Agostino, I. Albuquerque, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2016. — Mar. — Vol. 11, no. 03. — P03016. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/P03016>.
94. Study of large hemispherical photomultiplier tubes for the ANTARES neutrino telescope / J. Aguilar, A. Albert, F. Ameli, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2005. — Vol. 555, no. 1. — P. 132—141. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890020501836X>.
95. *BAIKAL collaboration*. BAIKAL-GVD. Gigaton Volume Detector in Lake Baikal (Scientific-Technical Report) : tech. rep. / BAIKAL collaboration ; Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Joint Institute for Nuclear Research, Irkutsk State University. — Moscow, 2012.
96. *Ильюшенко, Л. Ф.* Электролитические осажденные магнитные пленки / Л. Ф. Ильюшенко, М. У. Шелег, А. В. Болтушкин. — Минск : Наука и техника, 1979. — 280 с.
97. *Гроднев, И. И.* Экранирование в широком диапазоне частот / И. И. Гроднев. — Москва : Связь, 1986. — 328 с.
98. *Федосюк, В. М.* Наноструктурные пленки и нанопроволоки / В. М. Федосюк. — Издательский центр БГУ, 2006. — 310 с.
99. Многослойный электромагнитный экран / С. С. Грабчиков, Л. Б. Сосновская, Т. Е. Шарапа (Республика Беларусь). — № 20071404 ; заявл. 20.11.2007 ; опубл. 30.04.2009. — 7 с.
100. Многослойный электромагнитный экран для защиты фотоэлектронных умножителей и способ его нанесения / В. В. Дмитренко, А. Г. Батищев, П. Ю. Наумов [и др.] (Российская Федерация). — № 2474890 ; заявл. 27.05.2011 ; опубл. 02.10.2013. — 7 с.
101. *Ушаков, Н. А.* Разработка и создание полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа : Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Ушаков Никита Андреевич. — Москва : Институт ядерных исследований Российской академии наук, 2022. — URL: <https://www.inr.ru/rus/referat/uschakov/dis.pdf>.

102. Baksan Large Neutrino Telescope Project: Prototypes and Perspectives / A. Lukanov, A. Budzinskaya, A. Gangapshev, [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Feb. — Vol. 86. — P. 1380—1384.
103. *Фазлиахметов, А. Н.* Исследование взаимодействия нейтрино с ядрами ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Фазлиахметов Алмаз Наилович. — Москва : Институт ядерных исследований Российской академии наук, 2024. — URL: <https://www.inr.ru/rus/referat/fazliahmetov/dis.pdf>.
104. *Бухмиров, В. В.* ТЕПЛОМАССООБМЕН, учебное пособие / В. В. Бухмиров ; под ред. Т. Е. Созинова. — Иваново : ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2014. — 360 с.
105. *Цветков, Ф. Ф.* ТЕПЛОМАССООБМЕН: учебное пособие для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. — Москва : МЭИ, 2005. — 550 с.
106. Characterization of a liquid scintillator based on linear alkyl benzene for neutron detection / G. Bentoumi, X. Dai, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2013. — Vol. 701. — P. 221—224. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900212013149>.
107. Fluorescence emission of the JUNO liquid scintillator / M. Beretta, F. Houria, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2025. — May. — Vol. 20, no. 05. — P05009. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/05/P05009>.
108. Production and optical properties of liquid scintillator for the JSNS2 experiment / J. Park, S. Kim, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2019. — Sept. — Vol. 14, no. 09. — T09010. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/T09010>.
109. Production and optical properties of Gd-loaded liquid scintillator for the RENO neutrino detector / J. S. Park [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2013. — Vol. 707. — P. 45—53.
110. Scintillator phase of the SNO+ experiment / V. Lozza [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2012. — July. — Vol. 375, no. 4. — P. 042050. — URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/375/1/042050>.

111. The SABRE project and the SABRE Proof-of-Principle / M. Antonello [et al.] // The European Physical Journal C. — 2019. — Apr. — Vol. 79. — P. 363.
112. Production of a gadolinium-loaded liquid scintillator for the Daya Bay reactor neutrino experiment / W. Beriguete [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2014. — Vol. 763. — P. 82—88. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900214006834>.
113. Новикова, Г. Я. Современные методы очистки жидких сцинтилляторов, предназначенных для регистрации редких событий / Г. Я. Новикова // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2018. — Июль. — Т. 49, № 4. — С. 1360—1373.
114. Design and Simulation of Vacuum Distillation Column / S. Sultan, A. Hussain, [et al.]. — 06/2012.
115. Krell, E. Handbook of Laboratory Distillation / E. Krell. — 1982. — P. 524.
116. Gorak, A. Distillation: Fundamentals and Principles / A. Gorak, E. Sorensen. — 2014. — P. 507.
117. Handbook of Chromatography / G. Zweig [et al.] // Journal of The Electrochemical Society. — 1973. — Oct. — Vol. 120, no. 10. — P. 302C. — URL: <https://doi.org/10.1149/1.2403787>.
118. Nikalje, A. A Handbook of Chromatography / A. Nikalje. — 03/2017. — P. 284.
119. Robards, K. Principles and Practice of Modern Chromatographic Methods / K. Robards, D. Ryan. — 01/2021. — P. 1—518.
120. Гулевич, А. Л. Экстракционные методы разделения и концентрирования веществ / А. Л. Гулевич, С. М. Лещев, Е. М. Рахманько. — Минск : БГУ, 2009. — 153 с.
121. Characterization of scintillator mixtures based on n-dodecane and linear alkylbenzene / A. Sidorenkov [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. — 2026. — Feb. — Vol. 239. — P. 113337.
122. Becker, W. Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Techniques / W. Becker // Springer Series in Chemical Physics. — 2005. — Jan. — Vol. 81. — P. I—387.

123. Time Correlated Single-Photon Counting (Tcspc) Using Laser Excitation / D. Phillips [et al.] // Instrumentation Science & Technology. — 1985. — Jan. — Vol. 14, no. 3. — P. 267—292.
124. A setup for measuring the scintillation parameters of liquid organic scintillators / A. Sidorenkov [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2025. — Jan. — Vol. 20, no. 01. — T01008. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/01/T01008>.
125. *Förster, T.* Transfer Mechanisms of Electronic Excitation Energy / T. Förster // Radiation Research Supplement. — 1960. — Vol. 2. — P. 326—339.
126. *Birks, J. B.* Photophysics of Aromatic Molecules / J. B. Birks. — London, New York : Wiley-Interscience, 1970. — 704 p. — (Wiley Monographs in Chemical Physics).
127. *Sharnoff, M.* Photophysics of aromatic molecules: by John B. Birks / M. Sharnoff // Journal of Luminescence. — 1971. — Jan. — Vol. 4, no. 1. — P. 69—71.

Список рисунков

1.1	Магнитный экран в эксперименте Kamiokande [22].	14
1.2	Схема детектора Super-Kamiokande [24].	15
1.3	Общий вид детектора Borexino и его система очистки [30].	19
1.4	Магнитный экран ФЭУ в детекторе Borexino [32].	20
1.5	Магнитный экран ФЭУ в детекторе Double Chooz [42].	24
1.6	Распределение остаточного магнитного поля для ФЭУ, расположенных в области мишени и мюонного вето [52].	28
1.7	Конфигурация колец Гельмгольца для детектора Hyper-Kamiokande [58].	31
1.8	Распределение остаточного магнитного поля для каждого ФЭУ внутреннего детектора [58].	31
2.1	Основные элементы геомагнитного поля.	33
2.2	Модуль НМС5883L и магнитометр на его основе.	34
2.3	Схемотехника модуля НМС5883L [62].	34
2.4	Искажения магнитного поля [63].	35
2.5	Положение фотоумножителя относительно направления магнитного поля Земли, направление вращения ФЭУ в процессе измерений.	39
2.6	Зависимость коэффициента усиления фотоумножителя от расположения в магнитном поле Земли.	40
2.7	Измерительный стенд с катушками Гельмгольца и магнитная индукция, создаваемая катушками.	41
2.8	Расположение фотоумножителя в искусственно создаваемом магнитном поле.	42
2.9	Зависимость коэффициента усиления ФЭУ и отношения Пик/Долина от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.	43
2.10	Зависимость коэффициента усиления ФЭУ и отношения Пик/Долина от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.	43
2.11	Зависимость коэффициента усиления ФЭУ и отношения Пик/Долина от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.	44
2.12	Зависимость распределений времен пролета фотоэлектронов от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.	45
2.13	Зависимость распределений времен пролета фотоэлектронов от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.	45

2.14	Зависимость распределений времен пролета фотоэлектронов от изменения магнитного поля вдоль каждой оси ФЭУ.	46
2.15	Сравнение изменения коэффициента усиления фотоумножителя при его вращении без компенсации магнитного поля и с компенсацией.	47
2.16	Схема делителя напряжения для ФЭУ Hamamatsu R12860.	48
2.17	Спектры однофотоэлектронных импульсов ФЭУ Hamamatsu R12860 при разных положениях магнитном поле Земли	50
2.18	Спектры однофотоэлектронных импульсов ФЭУ Hamamatsu R12860 при компенсации разных компонент магнитного поля	52
2.19	Поведение магнитного поля в зависимости от вида экранирования [88].	53
2.20	Зависимость коэффициента усиления ФЭУ с магнитным экраном и без него от положения фотоумножителя в пространстве.	58
3.1	Чертеж водного резервуара прототипа с массой мишени 5 тонн.	62
3.2	Размеры фотоумножителя Hamamatsu R7081-100.	63
3.3	Размеры концентратора света, разработанного для ФЭУ Hamamatsu R7081-100.	63
3.4	Чертеж каркаса 5-тонного прототипа ББНТ с размещенными на нем ФЭУ с концентраторами света.	65
3.5	Карта остаточного магнитного поля на высоте 3.5 м, в районе расположения 3 яруса ФЭУ при креплении колец Гельмгольца на каркасе.	67
3.6	Карта остаточного магнитного поля на высоте 3 м, в районе расположения 2 яруса ФЭУ при креплении колец Гельмгольца на каркасе.	68
3.7	Карта остаточного магнитного поля на высоте 2.4 м, в районе расположения 1 яруса ФЭУ при креплении колец Гельмгольца на каркасе.	69
3.8	Карта остаточного магнитного поля на высоте 3.5 м, в районе расположения 3 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца в 20 см от каркаса.	71
3.9	Карта остаточного магнитного поля на высоте 3 м, в районе расположения 2 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца в 20 см от каркаса.	72

3.10	Карта остаточного магнитного поля на высоте 2.4 м, в районе расположения 1 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца в 20 см от каркаса.	73
3.11	Карта остаточного магнитного поля на высоте 3.5 м, в районе расположения 3 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара.	74
3.12	Карта остаточного магнитного поля на высоте 3 м, в районе расположения 2 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара.	75
3.13	Карта остаточного магнитного поля на высоте 2.4 м, в районе расположения 1 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара.	76
3.14	Карта остаточного магнитного поля вертикальной компоненты на высоте 3.5 м, в районе расположения 3 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара. . .	77
3.15	Карта остаточного магнитного поля вертикальной компоненты на высоте 3 м, в районе расположения 2 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара.	78
3.16	Карта остаточного магнитного поля вертикальной компоненты на высоте 2.4 м, в районе расположения 1 яруса ФЭУ при расположении колец Гельмгольца на стенках водного резервуара. . .	79
3.17	Схема укладки 7 витков в трубе.	90
3.18	Схема укладки 10 витков в трубе.	91
4.1	Спектры излучения PPO и bis-MSB в ЛАБ, сравнение со спектром пропускания оргстекла (слева). Сравнение спектра квантовой эффективности ФЭУ со спектрами излучения PPO и bis-MSB (справа).	96
4.2	Устройство роторного испарителя Heidolph.	98
4.3	Спектры поглощения образцов ЛАБ после очистки и исходного образца.	99
4.4	Схема развязки установки вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции.	103
4.5	Принципиальная технологическая схема установки вакуумной молекулярно-пленочной дистилляции.	104

4.6	Хроматографическая колонка, заполненная оксидом алюминия. . . .	108
4.7	Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки. . . .	109
4.8	Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки. . . .	111
4.9	Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки. . . .	113
4.10	Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки. . . .	115
4.11	Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки. . . .	117
4.12	Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки. . . .	119
4.13	Спектры поглощения ЛАБ после хроматографической очистки. . . .	121
4.14	Установка хроматографической очистки.	123
4.15	Схема установки хроматографической очистки.	124
4.16	Установка водной экстракции.	126
4.17	Схема установки водной экстракции.	128
4.18	Зависимость радиуса переливного порога легкой фазы от глубины вкручивания резьбовой трубки.	130
4.19	Спектры излучения РРО, растворенного в чистом ЛАБ (красный) и чистом п-додекане (синий), при возбуждении с помощью УФ-светодиода с длиной волны 280 нм	134
4.20	Спектры поглощения сцинтилляторов в зависимости от соотношения ЛАБ и п-додекана в смеси	135
4.21	Зарядовые спектры сцинтилляторов с различными соотношениями ЛАБ и п-додекана при фиксированной концентрации РРО 2 г/л . . .	136
4.22	Зависимость световыхода от содержания ЛАБ и п-додекана при концентрации РРО 2 г/л	137
4.23	Зарядовые спектры п-додекана при разной концентрации РРО . . .	138
4.24	Зависимость световыхода от разной концентрации РРО в п-додекане	139
4.25	Кинетика сцинтилляционного свечения смесей с различными соотношениями ЛАБ и п-додекана при фиксированной концентрации РРО 2 г/л	140
4.26	Кинетика сцинтилляционного свечения п-додекана при разной концентрации РРО	142

Список таблиц

1	Параметры системы компенсации магнитного поля в эксперименте JUNO	29
2	Значения коэффициента усиления ФЭУ в зависимости от его положения в пространстве без и с использованием системы компенсации магнитного поля	49
3	Остаточное магнитное поле в местах расположения ФЭУ при креплении катушек Гельмгольца на каркасе детектора	80
4	Остаточное магнитное поле в местах расположения ФЭУ при выносе катушек Гельмгольца на 20 см за каркас детектора	81
5	Остаточное магнитное поле в местах расположения ФЭУ при креплении катушек Гельмгольца на стенках водного резервуара	82
6	Основные свойства ЛАБ	94
7	Состав жидкого сцинтиллятора в других экспериментах и его длина ослабления света	94
8	Радиоактивные элементы, присутствующие в жидком сцинтилляторе, их источники и типичные концентрации, а также методы их удаления	95
9	Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после вакуумной дистилляции	100
10	Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки	110
11	Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки	112
12	Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после повторной хроматографической очистки	114
13	Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки с помощью неактивированного адсорбента	114
14	Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки с помощью активированного адсорбента	116
15	Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки с помощью активированного адсорбента	118

16	Поглощение и длина ослабления света образцов ЛАБ до и после хроматографической очистки с помощью активированного адсорбента	120
17	Технические характеристики сорбционной установки	125
18	Основные параметры центробежного экстрактора Solvex 08PTFE . .	127
19	Постоянные времени затухания и соответствующие вклады компонент для смесей n-додекана и ЛАБ	141
20	Постоянные времени затухания и соответствующие вклады компонент для сцинтилляторов на основе n-додекана с различной концентрацией РРО.	141