Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УДК 539.1

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ДЕТЕКТОРЕ РЭД-100

Научный руководитель	
(Старший преподаватель)	И. Н. Мачулин
Научный консультант	
(к.фм.н)	Г. Д. Долганов

Студент

____ Д. А. Кораблев

СОДЕРЖАНИЕ

Bı	ведеі	ние		3		
1	Экс	сперим	иент RED-100	4		
	1.1	Конф	игурация эксперимента	4		
2	Mo	делиро	ование электрического поля	6		
	2.1	Резул	ьтаты моделирования	8		
		2.1.1	Расчетная сетка модели	9		
		2.1.2	Эксперимент с уровнем LAr	10		
		2.1.3	Эксперимент с положением заземленной поверхности	11		
	2.2	Интер	опретация результатов	13		
3	Зак	лючен	ие	14		
С	Список использованных источников 15					

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительное внимание уделяется исследованиям когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядре (CE ν NS) [1]. Это процесс, в котором нейтрино с низкими энергиями (до десятков MэB) взаимодействуют с ядром как с единым целым посредством обмена Z-бозоном. Сечение такого рассеяния на несколько порядков превышает сечение при рассеянии нейтрино на электроне или отдельном нуклоне и не зависит от типа нейтрино. CE ν NS не только является новым инструментом для исследования свойств нейтрино, но и позволяет изучать структуру ядра. Кроме того, этот процесс может давать вклад в фоновый сигнал в экспериментах по поиску частиц темной материи.

Первое наблюдение $CE\nu NS$ стимулировало значительную теоретическую активность в области физики частиц, установив новые ограничения для физики за пределами Стандартной модели. $CE\nu NS$ имеет значительный эффект не только в физике высоких энергий, но и в астрофизике, ядерной физике и других научных дисциплинах. Это побудило развивать детекторы большего размера или с использованием новых технологий для увеличения чувствительности экспериментов. Например, использование двуфазных детекторов.

Такие детекторы могут использоваться для обнаружения когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядрах. Они заполняются благородным газом в двухфазном состоянии жидкость-газ. Дрейфовое электрическое поле в жидкой области используются для извлечения образовавшихся в ходе реакции с мишенью ионизационных электронов, а электролюминесцентное поле в газовой области - для извлечения этих электронов в газовую область.

Однородность и величина этих полей напрямую влияют на пространственное разрешение и точность энергетической реконструкции событий.

Поэтому точное моделирование распределения потенциала и напряжённости поля в объёме детектора RED-100 необходимо для оценки погрешностей и проведения экспериментов с различными конфигурациями детектора без необходимости менять саму установку.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ RED-100

Эксперимент **RED-100** [2]— это российский эксперимент, нацеленный на измерение $CE\nu NS$, оценку техногенного и естественного фона, использование метода нейтринного мониторинга за ядерными реакторами[3].

1.1 Конфигурация эксперимента

RED-100 развернут внутри здания 4-го энергоблока Калининской АЭС (Калининская область, Россия) на расстоянии 19 м от активной зоны. Пассивное экранирование включает 5 см медного экрана и 60 см водяного щита, что обеспечивает значительное подавление внешнего γ и нейтронного фона. [2]



Рисунок 1 — Конструкция детектора

Для обнаружения событий RED-100 имеет следующую конфигурацию: небольшая область газообразного аргона (GAr) находится над основной мишенью из жидкого аргона (LAr) (масса активного вещества 130кг). Равномерное электрическое поле внутри детектора создается с помощью катода, анода и гейтов и боковых колец, на которые подается потенциал с рассчитанным шагом. Это однородное поле вытягивает ионизационные электроны, возникающие при взаимодействии частиц с веществом, вверх к поверхности жидкости. Там электрическое поле извлекает электроны в газовую фазу, где они производят вторичные сцинтилляционные фотоны (S2) с помощью процесса, называемого «электролюминесценцией». Вторичные фотоны регистрируются с помощью фотоумножителей.

Благодаря такой конфигурации эксперимент позволяет определять координаты взаимодействия по трем осям: координаты X-Y - по распределению отклика сигнала S2 на верхних фотоумножителях, координата Z - по времени между сигналами S1 и S2. Однако, точность измерения координаты в детекторе зависит от того, с насколько постоянной и равномерной скоростью дрейфуют электроны, и смещаются ли они в процессе дрейфа. Кроме того, на точность измерения энергии наблюдаемого события сильно влияет неоднородность электрического поля в газовом кармане. В этом и состоит задача моделирования.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Моделирование детектора РЭД-100 невозможно свести к двумерной задаче, т.к. отличительной особенностью его конструкции является то, что катод, анод и гейт представляют собой гексагональную сетку, поэтому была создана трехмерная модель центральной части детектора.



Рисунок 2 — Геометрия моделируемой области

Однако, главной проблемой моделирования поля внутри детектора стала оптимизация параметров расчетной сетки, конфигурации детектора. Стандартные значения дают неточный результат, кроме того, потребляют большое количество оперативной памяти, что делает модель менее гибкой. Для этого в качестве моделируемого объема бралась внутренняя центральная активная часть детектора. Также была проделана работа по оптимизации расчетной сетки внутри газового и жидкого объема и на поверхности гейтов - было снижено количество узлов сетки и шаг увеличения, что позволило уменьшить ее число элементов.

Основная задача моделирования электрического поля состоит в том, чтобы понять его конфигурацию в детекторе и создать максимально гибкую модель, которая подойдет для того, чтобы можно было проводить эксперименты с различными конфигруациями детектора. Электрическое поле внутри детектора должно быть максимально однородным, поэтому при обнаружении участков неоднородности — необходимо проанализировать их влияние на работу детектора. В частности, в области проволочек сетки неизбежно формируются значительные искажения поля из-за резкого перепада напряжённости между электролюминесцентной и дрейфовой зонами и из-за других неочевидных эффектов.

В этой работе было проведено моделирование распределение электрического поля внутри центральной части детектора. Это позволит оценить возможное смещение проволочек под действием этих сил, узнать степень неоднородности поля и способы улучшения конструкции.

Также гибкая параметризация моделирования позволила рассчитать и визуализировать электрическое поле для различных конфигураций детектора, что позволяет выбрать наиболее подходящую под требования эксперимента.

2.1 Результаты моделирования

	T.T.						
Таблина I —	Изначальные	параметры	молели	лля	симулянии	электрического	поля
				°	·, ·		

Параметр	Значение
Расстояние между гейтами	3 mm
Расстояние от верхнего гейта до анода	16 мм
Расстояние от анода до земли	20 мм
Расстояние от нижнего гейта до катода	412 мм
Уровень жидкого аргона над гейтом	8 мм
Напряжение на аноде	2800 B
Напряжение на гейтах	-4800 B
Напряжение катоде	-13800 B



Рисунок 3 — Пример электрического поля в детекторе (В плоскости ZY)

2.1.1 Расчетная сетка модели



Рисунок 4 — Пример расчетной сетки

На Рис.4 можно подробнее рассмотреть оптимизированную конфигурацию расчетной сетки на одном из гейтов и в объеме LAr. В отличие от стандартных параметров, было уменьшено количество расчетных узлов засчет увеличения минимального размера звеньев и увеличения степени масштабирования, что привело к ускорению моделирования и уменьшению расчетных параметров.

2.1.2 Эксперимент с уровнем LAr

Первым результатом, который ожидалось получить в данной работе, был график зависимости значения электрического поля на границе раздела фаз от уровня жидкого аргона над верхним гейтом.

Номер	Значение уровня LAr(мм)
1	8
2	5
3	3
4	2
6	1
7	0.5
8	-0.5
9	-1
10	-1.5
11	-2

Таблица 2 — Перебираемые значения уровня LAr над гейтом





Рисунок 5 — Полученный результат для уровня LAr

Данный график интересен тем, что позволяет оценить минимальный уровень жидкого аргона, подходящий для задачи детектора РЭД-100.

2.1.3 Эксперимент с положением заземленной поверхности



Рисунок 6 — Пример линий электрического поля в детекторе

Из Рис.6 видно, что линии напряженности электрического поля в детекторе сильно отличаются по своей длине, что, совместно с сильной неоднородностью поля вдоль этих линий, приводит к неоднородности самого световыхода. Данная особенность может вносить значительную неопределенность в дальнейшую обработку сигнала.

Номер	Значение уровня земли(мм)
1	55
2	45
3	30
4	20
5	10
6	7
7	5

Таблица 3 — Перебираемые значения уровня заземленной поверхности над анодом



Рисунок 7 — Результаты эксперимента при разных расстояниях до заземлённой поверхности

Вторым результатом стала визуализация зависимости поля в плоскости ZY от положения земли (см. Рис.7). Она позволяет качественно оценить влияние положения заземленной поверхности на линии электрического поля.

2.2 Интерпретация результатов

Исходя из результатов эксперимента с уровнем LAr Puc.5 можно сказать, что располагать уровень раздела фаз ниже верхнего гейта нельзя, т.к. это сильно уменьшает значение вытягивающего поля, что приведет к значительному уменьшению сигнала или даже к его потере.

Согласно результатам моделирования второго эксперимента Рис.7, можно сказать, что уменьшение расстояния между анодом и землёй сильно влияет на линии напряжённости вблизи проволоки. Видно, что возможные траектории электронов практически схожи по своей длине. Однако, нельзя до конца утверждать об уменьшении неоднородности поля вдоль этих разных траекторий. Данный вопрос требует дальнейшего исследования.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной научно-исследовательской работы было проведено моделирование электрического поля в детекторе РЭД-100.

Произведённое моделирование позволило оценить распределение электрического поля рядом с проволокой. Результаты симуляций могут быть использованы для оптимизации конфигурации детектора и оценки его чувствительности к слабым сигналам.

Полученная модель отличается своей гибкостью благодаря распараметриации решения, что особенно полезно в проведении экспериментов с разными конфигурациями установки.

В дальнейшем, полученную модель можно расширить на весь объем детектора, но это потребует больших вычислительных мощностей. Также, основываясь на результатах проведенных экспериментов, можно оптимизировать конфигурацию детектора с учетом выявленных неоднородностей электрического поля. Кроме того, полученная модель может быть в дальнейшем использована для анализа световыхода для разных траекторий вытягиваемых электронов при различных начальных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Daniel Z. Freedman. Coherent effects of a weak neutral current. *Phys. Rev. D*, 9(5):1389– 1392, March 1974.
- Yu. Akimov, D. S. Alexandrov, I. R. Alyev, R. A. Belov, V. I. Bolozdynya, A. V. Etenko, A. V. Galavanov, A. M. Glagovsky, E. V. Gusakov, Y. V. Khromov, A. M. Kiselev, S. M. Konovalov, A. N. Kornoukhov, V. G. Kovalenko, A. S. Kozlova, E. V. Kumpan, A. V. Lukyashin, A. V. Pinchuk, A. E. Razuvaeva, O. G. Rudik, D. V. Shakirov, A. E. Simakov, G. V. Sosnovtsev, V. and A. Vasin, A. The red-100 experiment. *JINST*, 17(11):T11011, November 2022. Submitted 30 Sep 2022 (v1), revised 14 Nov 2022 (v2).
- M. Skorokhvatov. Development of neutrino method for control and monitoring of nuclear reactors. Report at meeting to evaluate potential applicability of antineutrino detection technologies for safeguards purposes, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, December 2003. 17–18 December 2003.