

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 СВЕТОВОХОДА  
ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ДЕТЕКТОРЕ  
РЭД-100

Научный руководитель

(к.ф.-м.н)

\_\_\_\_\_ Г. Д. Долганов

Научный консультант

(Старший преподаватель)

\_\_\_\_\_ И.Н. Мачулин

Студент

\_\_\_\_\_ Д. А. Кораблев

Москва 2025

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Эксперимент РЭД-100</b>	<b>5</b>
1.1 Конфигурация эксперимента . . . . .	5
1.2 Принцип регистрации . . . . .	6
1.3 Электродная структура . . . . .	7
<b>2 Моделирование</b>	<b>8</b>
2.1 Используемые программы для моделирования . . . . .	8
2.2 Выбор геометрии и расчёт поля . . . . .	8
2.3 Транспортные свойства электронов . . . . .	10
2.4 Модель электролюминесценции . . . . .	10
2.5 Процедура трекинга . . . . .	11
<b>3 Результаты</b>	<b>12</b>
3.1 Профиль световыхода вдоль траектории . . . . .	12
3.2 Тепловая карта световыхода в плоскости спавна . . . . .	12
3.3 Зависимость световыхода от центра ячейки . . . . .	13
3.4 Влияние уровня жидкого аргона . . . . .	14
<b>4 Заключение</b>	<b>17</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>18</b>

# ВВЕДЕНИЕ

В современной физике элементарных частиц одной из важнейших задач является исследование свойств нейтрино. Особый интерес представляет процесс когерентного упругого рассеяния нейтрино на атомных ядрах ( $CE\nu NS$ ) [1] — явление, при котором нейтрино низких энергий взаимодействует не с отдельными нуклонами, а со всем ядром целиком. Сечение такого взаимодействия имеет порядок  $10^{-38}$  см<sup>2</sup>, что позволяет рассматривать данный процесс как альтернативный способ детектирования нейтрино [2].

Регистрация событий  $CE\nu NS$  требует детекторов с предельно низким энергетическим порогом. Это объясняется тем, что ядро отдачи при таком взаимодействии уносит лишь кинетическую энергию порядка кэВ, и детектор должен быть способен зарегистрировать столь малый сигнал на фоне шумов.

Одним из перспективных решений являются двухфазные эмиссионные детекторы. В таких детекторах частица, проходя через жидкую среду, ионизирует его атомы: вдоль трека образуется облако свободных электронов. Приложенное вертикальное электрическое поле подхватывает эти электроны и тянет их вверх, к поверхности раздела жидкой и газовой фаз. Преодолев поверхность, электроны попадают в газовый слой, где поле резко усиливается. В этой зоне высокого поля каждый электрон набирает достаточно энергии, чтобы при столкновении с атомом газа возбудить его, в процессе релаксации возбуждённый атом испускает фотон — этот процесс и называется **электролюминесценцией** (ЭЛ). Так из одного первичного электрона рождается целый поток фотонов, образующих интенсивный световой сигнал **S2**, который регистрируется фотодатчиками.

Принципиально важно, что сигнал S2 пропорционален числу первичных электронов, то есть энергии, переданной частицей жидкому аргону. Именно поэтому амплитуда S2 непосредственно определяет энергетическое разрешение детектора: чем больше фотонов удаётся собрать с каждого электрона, тем точнее можно восстановить энергию исходного события.

В идеале число фотонов не должно зависеть от координаты вылета первичного электрона из жидкой области детектора, однако траектория движения электрона может повлиять на финальный фотовыход, именно эта неоднородность будет изучаться в данной работе.

Ключевую роль в формировании сигнала S2 играет конфигурация электрического поля в газовом зазоре, которая зависит, в том числе, от уровня жидкого аргона над гейтовой сеткой.

В рамках данной работы проводилось моделирование световых выходов ЭЛ в газовой фазе детектора РЭД-100. Для каждого дрейфующего электрона вычислялось ожидаемое число фотонов методом интегрирования вдоль траектории. Исследовалась зависимость световых выходов от координат точки старта электрона в плоскости XY, а также от уровня

жидкого аргона над верхней проволокой гейтовой сетки (от 2 до 12 мм).

# 1. ЭКСПЕРИМЕНТ РЭД-100

Эксперимент **РЭД-100** [3] — это двухфазный эмиссионный детектор, нацеленный на регистрацию событий  $CE\nu NS$ .

## 1.1 Конфигурация эксперимента

Установка РЭД-100 располагалась в непосредственной близости от активной зоны реактора ВВЭР-1000 на Калининской АЭС. Реактор является мощным источником антинейтрино, что позволяет компенсировать чрезвычайно малое сечение взаимодействия нейтрино с веществом высоким потоком частиц.

Сам детектор — это большой криостат (Рисунок 1), внутри которого находится благородный газ в жидком и газообразном состоянии. В текущей версии установки используется аргон, поскольку он обеспечивает большую энергию отдачи ядра. Масса активного вещества составляет около 100 кг. Чтобы внешний фон не вносил вклад в измерения, детектор окружён защитой из 5 см меди и более 50 см воды.

## Нейтронный детектор РЭД-100

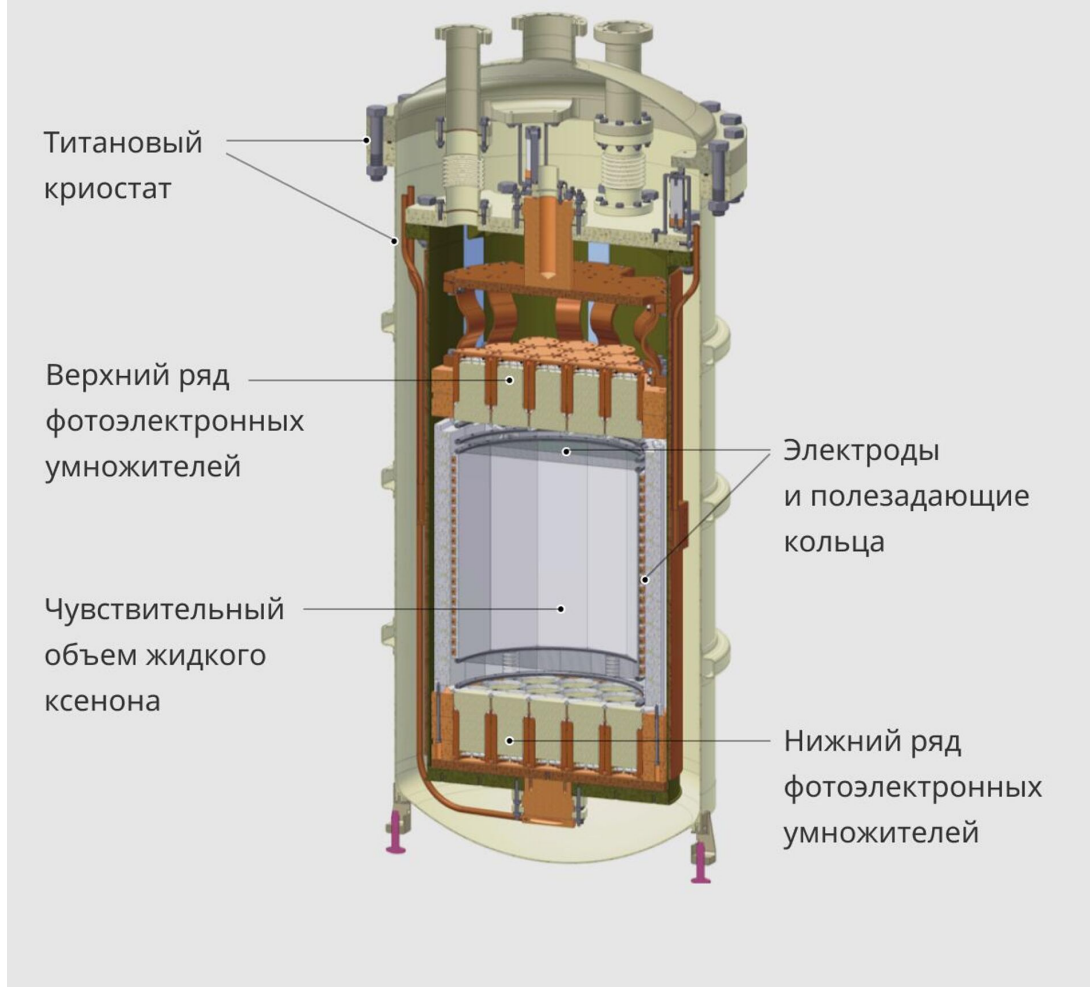


Рисунок 1 — Конструкция детектора RED-100.

### 1.2 Принцип регистрации

Детектор работает по следующему принципу:

1. Когда частица взаимодействует с жидким аргоном, происходит вспышка сцинтилляционного света — сигнал **S1**. Одновременно образуются электроны ионизации.
2. Электроны подхватываются дрейфовым электрическим полем и движутся вверх к поверхности жидкости.
3. Достигнув поверхности раздела фаз, электроны переходят в газовую область, где, ускоряясь в сильном поле, вызывают электролюминесценцию. Это второй, значительно более мощный сигнал — **S2**.

Оба сигнала регистрируются фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), расположенными в верхней и нижней частях детектора. Задержка между S1 и S2 определяет глубину события (координату  $Z$ ), а распределение света по ФЭУ — координаты в плоскости  $XY$ .

### 1.3 Электродная структура

Для создания необходимых электрических полей внутри объёма детектора натянуто несколько сетчатых электродов: катод (внизу), гейт, представляющий собой две сетки на расстоянии 3 мм друг от друга (вблизи поверхности раздела фаз), и анод (вверху газовой фазы). Сетки изготовлены из тонких проволок, образующих шестиугольный узор с диаметром ячейки 4 мм. Однородность дрейфового поля в жидком аргоне достигается с помощью формирующего поле колец, окружающих активный объём. Напряжения на электродах приведены в Таблице 1.

Таблица 1 — Напряжения на электродах детектора РЭД-100

Электрод	Напряжение, В
Анод	+7000
Гейты	-4000
Катод	-13000

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

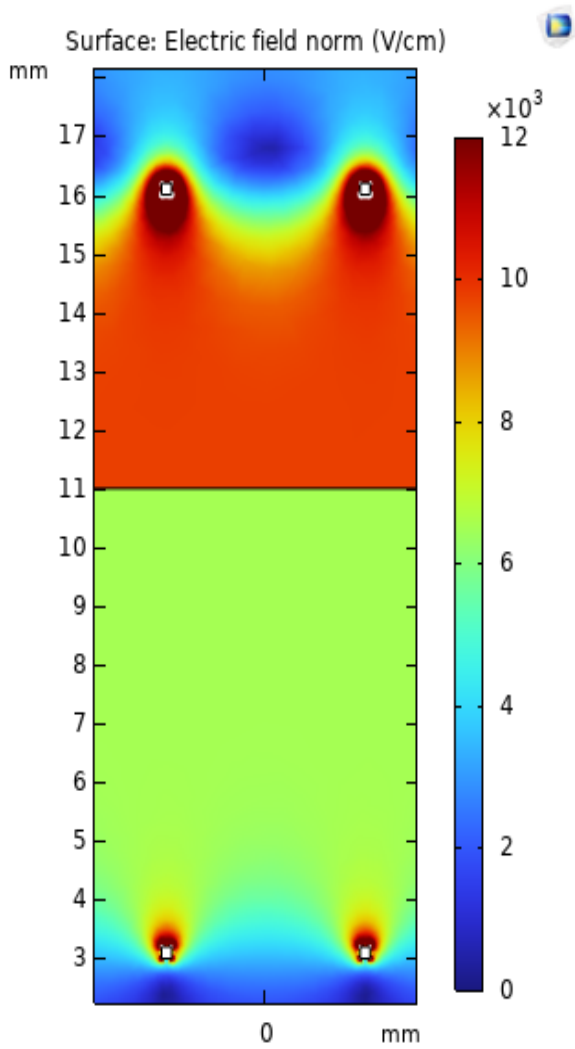
### 2.1 Используемые программы для моделирования

Для моделирования использовались следующие инструменты:

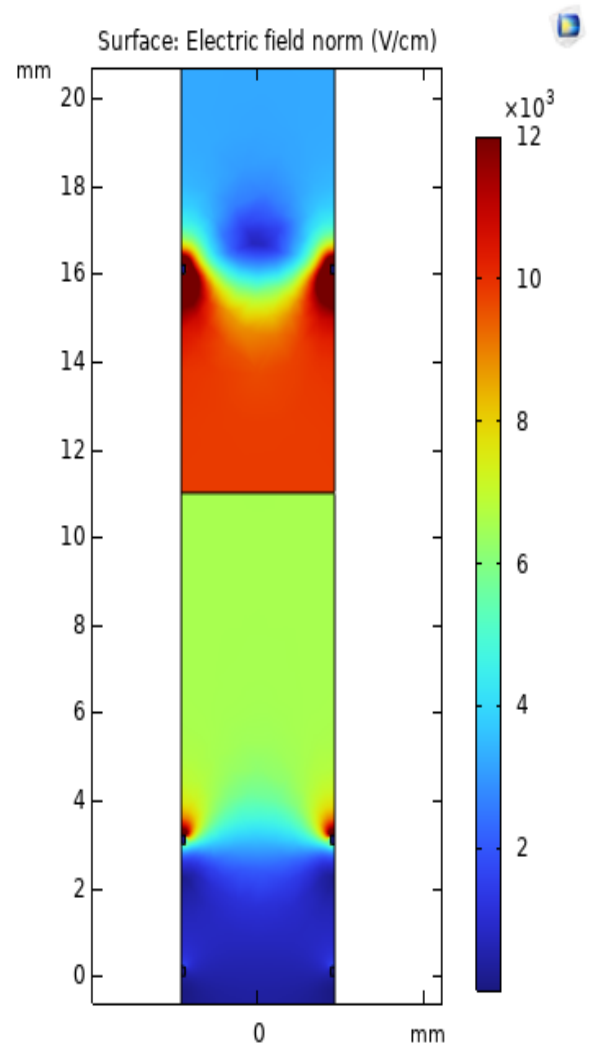
- **COMSOL Multiphysics** — расчёт распределения электрического поля в объёме детектора на основе трёхмерной конечно-элементной модели;
- **Magboltz** — вычисление транспортных свойств электронов в газовом аргоне (скорость дрейфа в зависимости от поля);
- **Garfield C++** — трекинг электронов и интегрирование световыхода вдоль траектории.

### 2.2 Выбор геометрии и расчёт поля

Электроды в РЭД-100 представляют собой сетки с шестиугольными ячейками. Расчёт поля сразу во всём объёме детектора требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому для моделирования выбрана одна повторяющаяся шестиугольная ячейка с условиями периодичности на боковых гранях. Такой подход обоснован тем, что поле в оптимизированной ячейке совпадает с полем в полной модели при наложении периодических граничных условий (Рисунок 6).



(a)



(б)

Рисунок 2 — Электрическое поле вблизи сетки: (а) изначальная конфигурация; (б) оптимизированная конфигурация с условием периодичности.

Расчёт поля в COMSOL выполнялся отдельно для каждого из исследуемых уровней жидкого аргона над верхней проволокой гейтовой сетки: 2, 4, 6, 8, 9, 11 и 12 мм. Изменение уровня LAr смещает границу раздела фаз и меняет граничные условия задачи, что отражается на конфигурации поля в газовом зазоре. Геометрические параметры модели приведены в Таблице 2.

Таблица 2 — Геометрические параметры модели

Параметр	Значение
Расстояние между гейтами	3 мм
Расстояние от верхнего гейта до анода	16 мм
Расстояние от анода до земли	20 мм
Расстояние от нижнего гейта до катода	415 мм
Диаметр ячейки сетки	4 мм

### 2.3 Транспортные свойства электронов

Скорость дрейфа электрона в газовом аргоне как функция напряжённости поля была получена с помощью расширения Magboltz. Расчёт выполнялся при рабочих условиях детектора: температура 87 К, давление 760 мм.рт.ст. Полученная таблица скоростей использовалась Garfield C++ для вычисления локальной скорости электрона в каждой точке траектории.

### 2.4 Модель электролюминесценции

Ожидаемое число фотонов, испускаемых электроном на элементарном отрезке пути  $dl$ , описывается формулой Бузулуцкова [4]:

$$\frac{dN}{dl} = \alpha_{\text{EL}} \cdot \max(0, E(l) - E_{\text{th}}), \quad (1)$$

где  $E(l)$  [В/см] — напряжённость поля вдоль траектории,  $E_{\text{th}}$  [В/см] — пороговое поле электролюминесценции,  $\alpha_{\text{EL}}$  [Фотон/кВ] — коэффициент усиления. Данное приближение характерно для электрических полей порядка кВ/см, при дальнейшем увеличении основной вклад начинает вносить ионизация. Интегрирование по полной траектории даёт суммарный световыход:

$$N_{\text{ph}} = \int_0^{\text{Stot}} \alpha_{\text{EL}} \cdot \max(0, E(s) - E_{\text{th}}) ds. \quad (2)$$

Параметры модели взяты из работы [5] и масштабированы на рабочую плотность газа [4]. Поскольку рабочие условия (87 К, 760 мм.рт.ст) существенно отличаются от стандартных (273 К, 760 мм.рт.ст), параметры пересчитывались через фактор плотности:

$$k_p = \frac{p/p_0}{T/T_0} = \frac{760/760}{87/273,15} \approx 3,14. \quad (3)$$

## 2.5 Процедура трекинга

На каждом шаге интегрирования  $\Delta t = 0,01$  нс выполнялись следующие операции:

1. вычисление напряжённости поля  $\mathbf{E}$  в текущей точке через интерполяцию по сетке COMSOL;
2. определение скорости дрейфа  $\mathbf{v}$  из таблицы Magboltz;
3. вычисление пройденного пути  $dl = |\mathbf{v}| \Delta t$  и обновление координат;
4. накопление числа фотонов  $dN = \alpha_{\text{EL}} \max(0, E - E_{\text{th}}) dl$ .

Трекинг завершался при выходе электрона из газовой области. Для каждой конфигурации уровня LAg запускалось **4000 электронов**, стартовые координаты которых равномерно распределялись по квадрату  $[-0,2; 0,2] \times [-0,2; 0,2]$  см в плоскости XY, покрывая одну полную ячейку сетки. Координата  $z_0$  определялась уровнем жидкого аргона (уровень 8 мм соответствует  $z_0 = 1,11$  см в системе координат модели).

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 3.1 Профиль световыхода вдоль траектории

На Рисунке 3 показан кумулятивный световыход  $N_{\text{ph}}(s)$  и  $Z(s)$  как функции пройденного пути  $s$  и вертикальной координаты  $z$  для типичной траектории при уровне LAg 8 мм. Вклад в световыход начинается лишь после входа электрона в область поля выше порогового  $E_{\text{th}}$ : это соответствует зазору между гейтовой сеткой и анодом, где поле наиболее велико. Участки траектории в межгейтовом зазоре и в жидком аргоне в световыход практически не вносят.

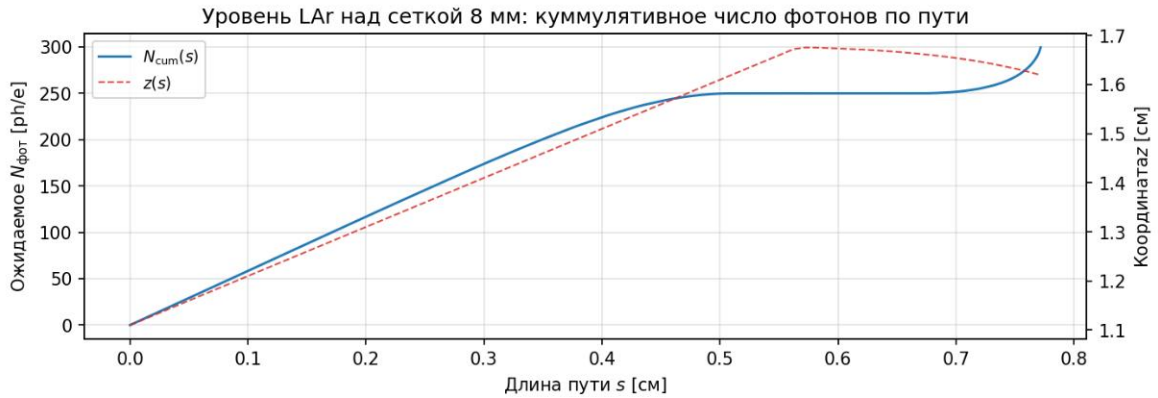


Рисунок 3 — Кумулятивный световыход  $N_{\text{ph}}$  в зависимости от пройденного пути  $s$  и вертикальной координаты  $z$  (уровень LAg 8 мм).

### 3.2 Тепловая карта световыхода в плоскости спавна

На Рисунке 4 представлена тепловая карта ожидаемого числа фотонов  $N_{\text{ph}}(x_0, y_0)$  для уровня LAg 8 мм. Карта демонстрирует отчётливую неоднородность: минимальный световыход наблюдается в центре ячейки, а вблизи проволок гейтовой сетки он увеличивается. Это объясняется тем, что электроны, стартующие над проволоками, попадают в области под анодом, где электрическое поле имеет большое значение, увеличивая интеграл (2).

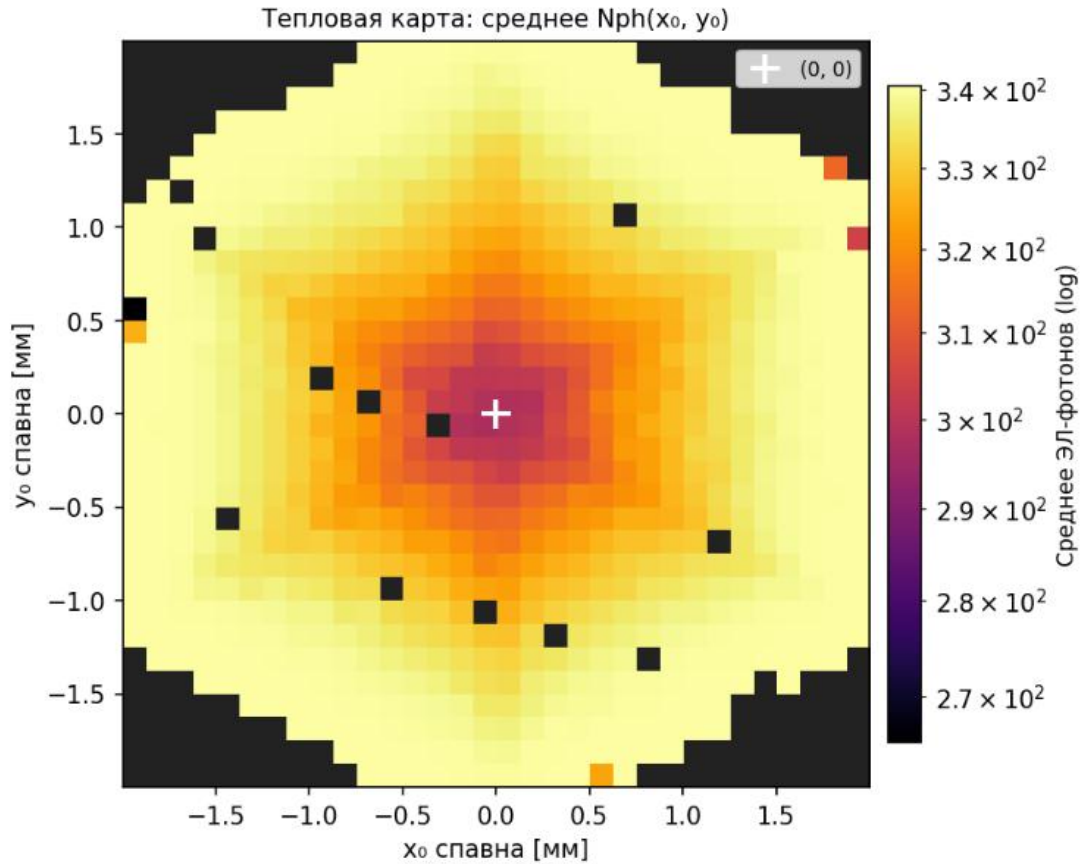


Рисунок 4 — Тепловая карта световыхода  $N_{\text{ph}}(x_0, y_0)$  для уровня LAr 8 мм.

### 3.3 Зависимость световыхода от центра ячейки

Также была получена зависимость количества фотонов от расстояния до центра ячейки  $N_{\text{ph}}(r_0)$ , где  $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$  — расстояние от центра ячейки до точки старта. На Рисунке 5 показана эта зависимость для уровня LAr 8 мм. Световыход монотонно растет с ростом  $r_0$ : электроны из центра ячейки производят заметно больше фотонов, чем электроны, стартующие вблизи проволок.

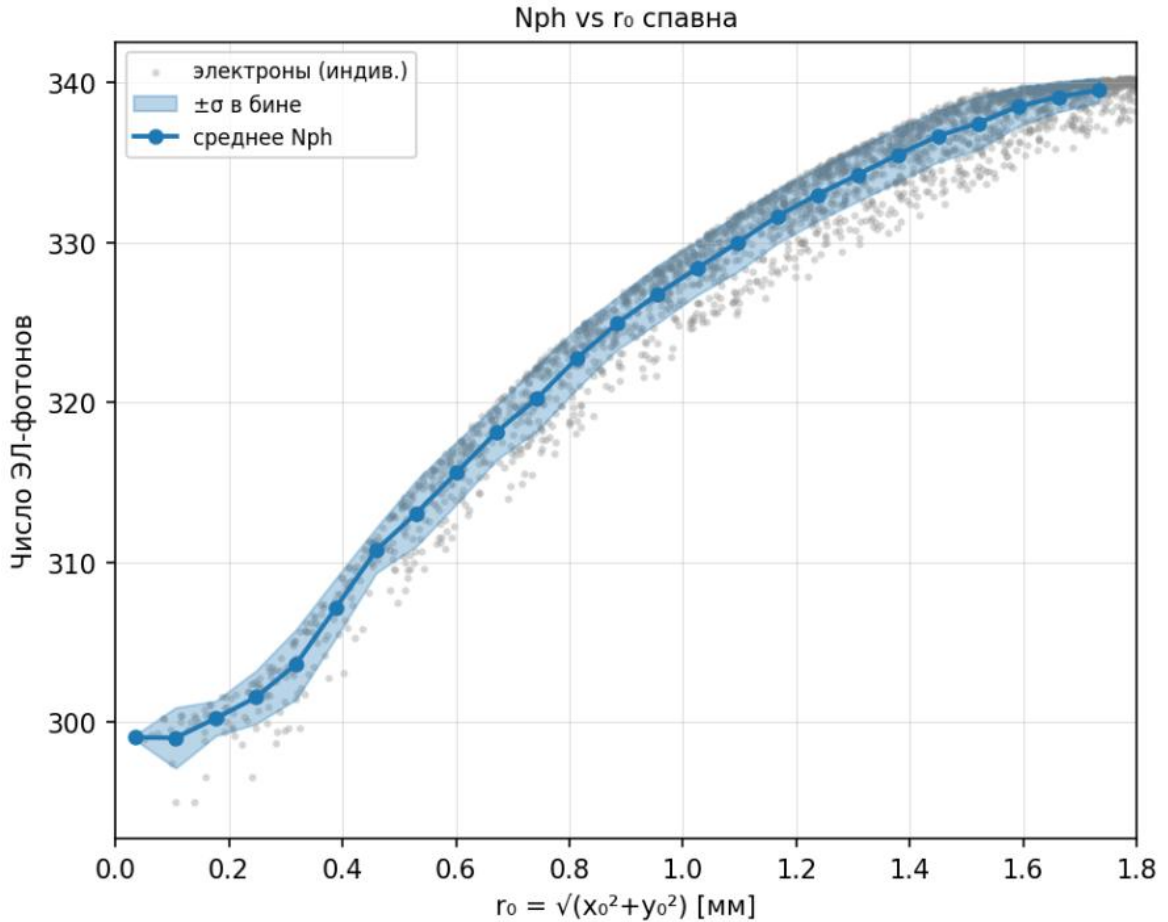


Рисунок 5 — Зависимость ожидаемого числа ЭЛ-фотонов от радиуса спавна  $r_0$  (уровень LAr 8 мм). Полоса обозначает стандартное отклонение внутри кольцевого бина.

### 3.4 Влияние уровня жидкого аргона

На Рисунке 6 приведены профили  $N_{ph}(r_0)$  для всех исследованных уровней от 2 до 12 мм. С увеличением уровня LAr средний световыход падает (Рисунок 7): более толстый слой жидкости смещает поверхность раздела фаз дальше от гейтовой сетки и делает область газового дрейфа меньше. При этом неоднородность световыхода по ячейке при больших уровнях выражена сильнее, чем при меньших.

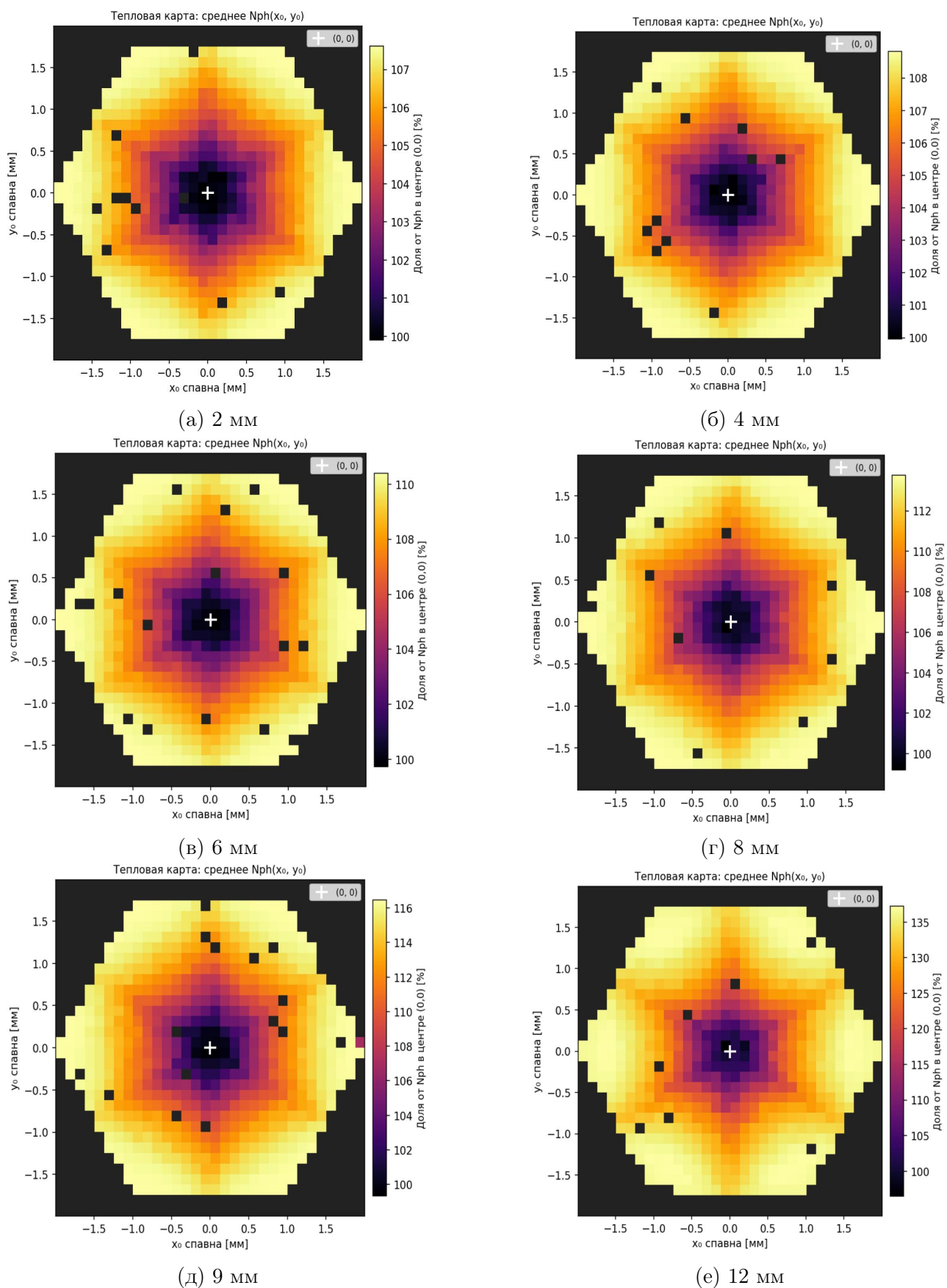


Рисунок 6 — Тепловые карты для уровней LAr 2, 4, 6, 8, 9, 12 мм над верхним гейтом

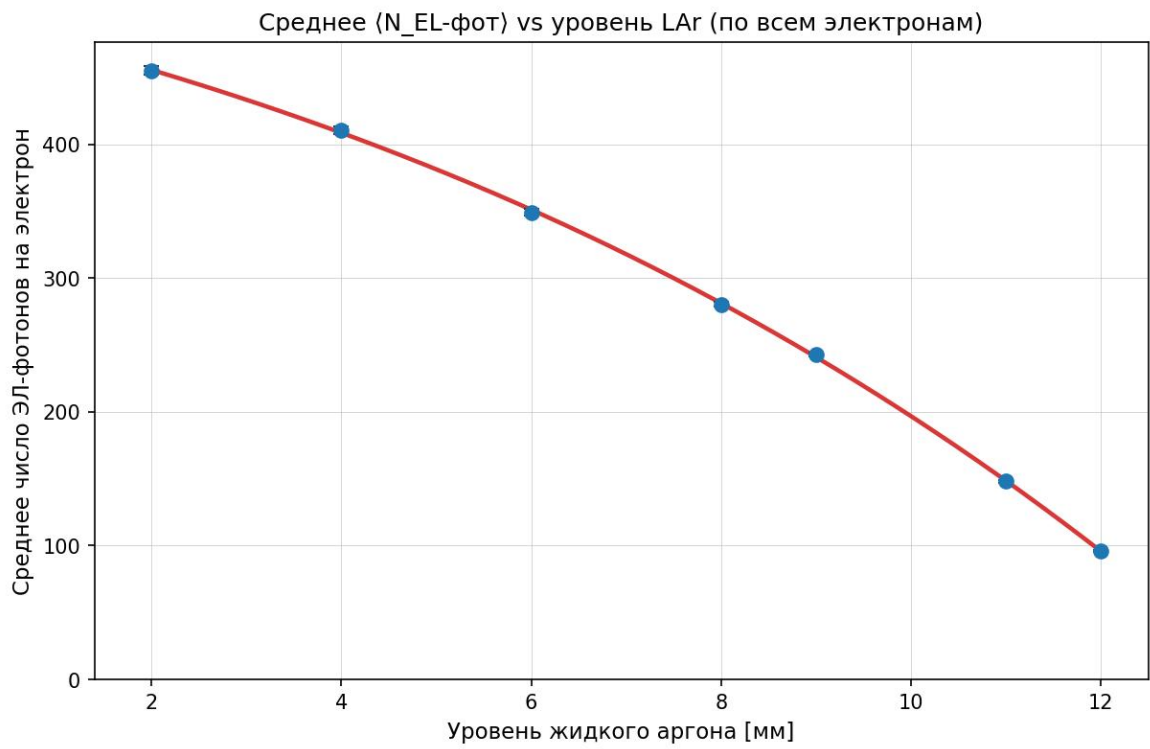


Рисунок 7 — Зависимость ожидаемого числа ЭЛ-фотонов от уровня жидкого аргона над гейтом.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено моделирование световыхода электролюминесценции в газовой фазе детектора РЭД-100. Для расчёта ожидаемого числа фотонов на каждой траектории использовалась линейная модель (1) с параметрами, масштабированными на рабочие условия детектора (87 К, 760 мм.рт.ст).

Было показано, что основной вклад в световыход S2 формируется на длинном участке в газовом кармане. Построенная тепловая карта  $N_{\text{ph}}(x_0, y_0)$  демонстрирует отчётливую неоднородность в пределах одной ячейки шестиугольной сетки: минимум световыхода наблюдается в центре ячейки, максимум — над проволоками. Наконец, в ходе систематического исследования влияния уровня жидкого аргона (от 2 до 12 мм) установлено, что с ростом уровня средний световыход уменьшается, а неоднородность по ячейке увеличивается.

Таким образом, неоднородности поля вблизи проволок сетки приводят к разбросу световыхода в зависимости от поперечных координат электрона, что ухудшает координатное разрешение и энергетическую калибровку.

Полученные результаты позволяют количественно оценить вклад неоднородности поля вблизи анодной сетки в разброс амплитуды сигнала S2.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. D. Z. Freedman, “Coherent neutrino nucleus scattering as a probe of the weak neutral current,” *Phys. Rev. D*, vol. 9, pp. 1389–1392, 1974.
2. N. Van Dessel *et al.*, “Nuclear structure aspects of spin-(in)dependent coherent elastic neutrino-nucleus scattering,” *Phys. Rev. C*, vol. 101, 035502, 2020.
3. D. Yu. Akimov *et al.* (RED-100 Collaboration), “First ground-level laboratory test of the two-phase xenon emission detector RED-100,” *JINST*, vol. 17, P11011, 2022.
4. A. Buzulutskov, “Electroluminescence and electron avalanche in two-phase argon detectors,” *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 55, no. 1, pp. 60–80, 2012.
5. C. A. B. Oliveira *et al.*, “A simulation toolkit for electroluminescence assessment in rare event experiments,” *JINST*, vol. 6, P06003, 2011.