

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 53.08, 539.1.06

**ОТЧЕТ ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССАХ РАДИОИЗОТОПНЫМ МЕТОДОМ»**

Студент

\_\_\_\_\_ Д. Е. Калашников

Научный руководитель,

к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. В. Хромов

Москва 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Список сокращений и специальных терминов</b>	<b>3</b>
<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1 Теоретическое введение</b>	<b>7</b>
1.1 Типы и характеристики ионизирующего излучения . . . . .	7
1.2 Источники фотонного излучения . . . . .	8
1.3 Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом . . .	11
1.4 Принципы работы приборов технологического контроля на ионизирующем излучении (на примере металлургической от- расли) . . . . .	14
<b>2 Описание проекта</b>	<b>19</b>
2.1 Технологические процессы на производстве . . . . .	19
2.2 Описание прототипа гамма-реле . . . . .	22
<b>3 Разработка прототипа блока обработки информации</b>	<b>24</b>
3.1 Выбор технической базы . . . . .	24
3.2 Разработка программного комплекса . . . . .	25
3.3 Анализ термокомпенсации . . . . .	26
<b>4 Заключение</b>	<b>30</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>32</b>

# СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

АСУ ТП	Автоматизированная система управления технологическими процессами
ПЛК	Программируемый логический контроллер
БД	Блок детектирования
БОИ	Блок обработки информации
ИИ	Ионизирующее излучение
РИ	Радиоизотопный [прибор или принцип]
SiPM	Кремниевый фотоумножитель
МНЛЗ	Машина непрерывного литья заготовок
ОУ	Операционный усилитель
ЧерМК	Череповецкий металлургический комбинат
ТАГМЕТ	Таганрогский металлургический завод
ОС	Операционная система
ТЗ	Техническое задание

# ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой упор в промышленности идет на повышение эффективности расходования имеющихся ресурсов и удешевления процессов вкупе с сохранением (или улучшением) качества продукции. Одним из наиболее перспективных методов такого перехода является внедрение автоматизированных<sup>1</sup> систем управления технологическими процессами.

Типовая АСУ ТП состоит из 3 архитектурных уровней [1]:

- Функции получения и первичного преобразования информации о протекании технологических процессов и об оперативном состоянии оборудования.
- Функции регулирования, противоаварийной защиты и блокировок (в аппаратном плане этот уровень представлен ПЛК).
- Функции оперативного (диспетчерского) контроля и управления технологическими объектами.

Приборы, работающие на первом (еще называемом полевым) уровне, представляют собой датчики, детекторы, анализаторы и т.п. Физические принципы их работы разнообразны и включают в себя:

- акустические;
- механические;
- тепловые;
- электромагнитные;
- оптические;
- на основе ионизирующего излучения и др.

Датчики, принцип работы которых основан на использовании ионизирующего излучения, традиционно используются во многих отраслях промышленности: от пищевой до металлургической и нефтехимической. Гибкость данного метода заключается в возможности использовать разные ви-

---

<sup>1</sup>Понятие «автоматизированный», в отличие от понятия «автоматический», подчёркивает необходимость участия человека в отдельных операциях, как в целях сохранения контроля над процессом, так и в связи со сложностью или нецелесообразностью автоматизации отдельных операций.

ды излучения в разных условиях, ориентируясь на требуемые целевые характеристики. Обычно используются следующие виды излучений:

- $\beta$ -излучение;
- $\gamma$ -излучение;
- рентгеновское.

Среди преимуществ данного метода [2]:

- надежность;
- быстродействие;
- совместимость с другими электромагнитными приборами (генерирующими собственные поля);
- универсальность.

Большая часть применяемого оборудования на этом принципе является зарубежной, а отечественные аналоги либо не обеспечивают необходимый функционал, либо вовсе отсутствуют на рынке. Критическим является тот факт, что все приборы, использующие в своей основе ИИ, обладают ограниченным сроком службы, после которого требуется либо замена, либо сервис генерирующих излучение элементов. Создание отечественных приборов технологического контроля на радиоизотопном принципе является стратегически важной задачей для обеспечения экономического суверенитета страны. **Целью настоящей работы** является создание системы сбора и анализа данных, получаемых с радиоизотопных приборов для Череповецкого металлургического комбината ПАО «Северсталь».

Поскольку проект по разработке данного прибора является многоуровневым и требует проведения экспериментальных сеансов перед обработкой данных, были поставлены следующие подготовительные задачи:

- разработка программного комплекса для управления блоком обработки информации;
- отладка прошивки блока детектирования и обеспечение корректного взаимодействия блока детектирования и блока обработки информации;

- проверка корректности работы термокомпенсации в блока детектирования.

**Практическая значимость:**

- Настоящая работа является интегральной частью проекта по разработке профилемера горячего проката, реализуемого с целью импортозамещения и повышения технологического суверенитета РФ в критических областях промышленности.
- Реализованные методы будут применяться в дальнейшем для разработки других приборов технологического контроля на РИ или рентгеновском принципе.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

## 1.1 ТИПЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ионизирующим считается любое излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию в нем ионов. Это происходит, поскольку излучение способно выбивать электроны из атомов вещества. По этой причине к ИИ не относятся виды излучения, энергия которых недостаточна для ионизации (например, видимый свет или лазерное излучение). [3]

По своей природе ИИ является потоком определенных частиц, в зависимости от масс и зарядов которых можно выделить несколько типов излучения:

- тяжелые заряженные частицы, к ним относятся  $\alpha$ -частицы, протоны и др.;
- легкие заряженные частицы: электроны и позитроны;
- фотонное излучение: рентгеновское излучение и  $\gamma$ -излучение;
- нейтроны различных энергий.

### Основные характеристики ИИ:

#### 1) Энергия излучения

В зависимости от энергии частиц излучение бывает *моноэнергетическим* (в случае, если все частицы обладают одинаковой кинетической энергией) и *немоноэнергетическим*. От энергии излучения зависят процессы, происходящие по мере распространения излучения. Для немонаэнергетического ИИ энергия численно характеризуется следующей величиной.

#### 2) Спектр частиц

Это зависимость числа частиц излучения, вылетающих в телесный угол  $d\Omega = \sin\theta d\phi d\theta$  и имеющих энергию в диапазоне  $(E; E + dE)$ , от

телесного угла  $d\Omega$  и энергии  $E$ :

$$\frac{d^2 N}{d\Omega dE}$$

3) Угловое распределение частиц

Является интегралом спектра частиц по всем энергиям:

$$\rho(\theta, \phi) = \frac{dN}{d\Omega} = \int \frac{d^2 N}{d\Omega dE} dE$$

4) Энергетический спектр частиц

Наоборот, является интегралом спектра частиц по всем направлениям (по полному допустимому телесному углу в имеющейся геометрии):

$$\rho(E) = \frac{dN}{dE} = \int \frac{d^2 N}{d\Omega dE} d\Omega$$

5) Интенсивность излучения

Задаёт количество частиц ИИ, переходящих ориентированную площадку в пространстве за интервал времени  $dt$ , отнесенное к величине этого интервала:

$$I = \frac{dN}{dt}$$

Интенсивность сохраняет энергетическое и угловое распределение потока частиц в данный момент времени, однако является мгновенной величиной, а потому чаще применяется в теоретических выводах и расчетах, чем интегральное количество зарегистрированных частиц.

В рамках настоящей работы в дальнейшем мы будем рассматривать исключительно фотонное ИИ (то есть  $\gamma$ - и рентгеновское излучение).

## 1.2 ИСТОЧНИКИ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

К фотонному излучению относится [3]:

- $\gamma$ -излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер, при ядерных превращениях или аннигиляции частиц;



- тормозное излучение при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц (имеет непрерывный энергетический спектр);
- характеристическое излучение при изменении энергетических состояний электронных оболочек атомов (имеет дискретный спектр);
- рентгеновское излучение (тормозное и характеристическое).

Рассмотрим подробнее рентгеновское и  $\gamma$ -излучение. Основным прикладным источником гамма-излучения являются естественно радиоактивные изотопы (в частности,  $\beta$ -активные изотопы). Рассмотрим, например, процесс распада  $^{60}\text{Co}$  и  $^{22}\text{Na}$  [4]:

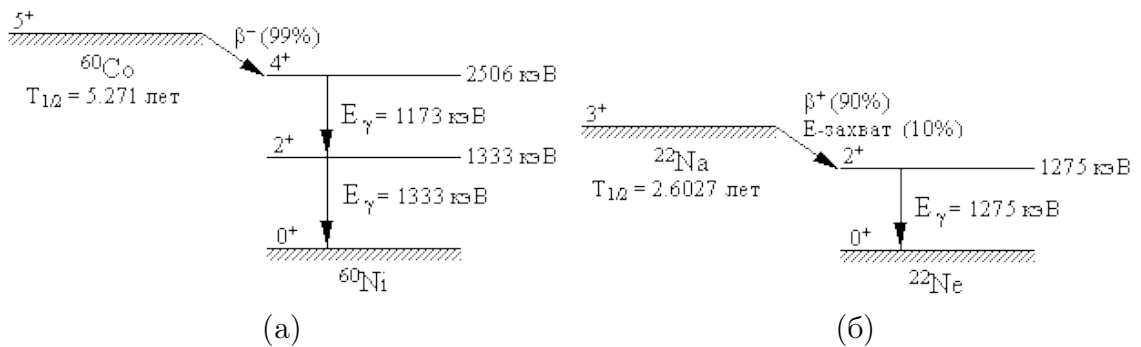


Рисунок 1 — схемы наиболее интенсивных распадов изотопов кобальта (а) и натрия (б)

Ядро  $^{60}\text{Co}$  в основном распадается на возбужденное состояние ядра  $^{60}\text{Ni}$  в возбужденном состоянии  $4+$ . Это возбуждение снимается при помощи каскада  $E2$ -переходов, в результате чего образуются два  $\gamma$ -кванта с энергиями 1.173 МэВ и 1.333 МэВ.

Ядро  $^{22}\text{Na}$  претерпевает  $\beta^+$ -распад с образованием ядра  $^{22}\text{Ne}$  в состоянии  $2+$ . Возбуждение снимается при помощи  $E_\gamma = 1.275$  МэВ. Кроме того, после аннигиляции позитрона с электронами вещества образуются 2 кванта с энергией 511 кэВ.

Ширины  $\gamma$ -линий можно считать пренебрежимо малыми по сравнению с энергиями самих квантов, а поэтому гамма-излучение можно считать монохроматическим (а спектры атомов — линейчатыми). Интенсивность промышленных  $\gamma$ -источников обычно достигает  $I \approx 10^7 \frac{\text{квантов}}{\text{с}}$ . При этом важно отметить, что по закону радиоактивного распада активность источника снижается с течением времени, причем скорость этого процесса

зависит от периода полураспада изотопа:

$$I(t) = I_0 2^{-t/T_{1/2}}$$

Рентгеновское излучение в основном генерируется при помощи специальных излучателей («рентгеновских трубок»). Концептуальная схема рентгеновской трубки представлена на рисунке 2 [5].

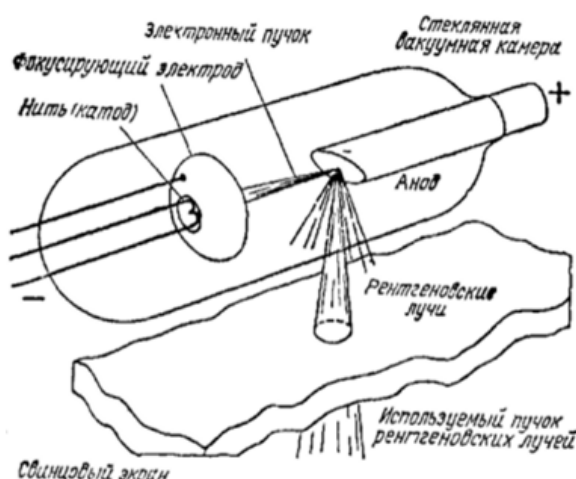


Рисунок 2 — схема работы рентгеновского излучателя

Спектр и интенсивность рентгеновского излучения, получаемого с такой трубки, зависит от разности потенциалов между катодом и анодом. Типичные значения напряжения составляют порядка 60–80 кВ, но для получения жесткого излучения могут использоваться источники напряжения  $> 200$  кВ. Интенсивность рентгеновского излучения от трубки может достигать  $10^{10} \frac{\text{квантов}}{\text{с}}$ , что на несколько порядков выше предела  $\gamma$ -излучения. Спектр имеет непрерывный характер и ни в каком приближении не может считаться монохроматическим:

Сравнение этих двух типов излучения можно резюмировать следующим образом:

- $\gamma$ -излучение является более стабильным и простым с точки зрения анализа (благодаря монохроматичности), однако его интенсивность нельзя варьировать в процессе использования самостоятельно – она уменьшается непрерывно с течением времени.
- Рентгеновское излучение требует наличия высоковольтного стабильного источника питания и сложнее в обработке (спектр непрерывен),

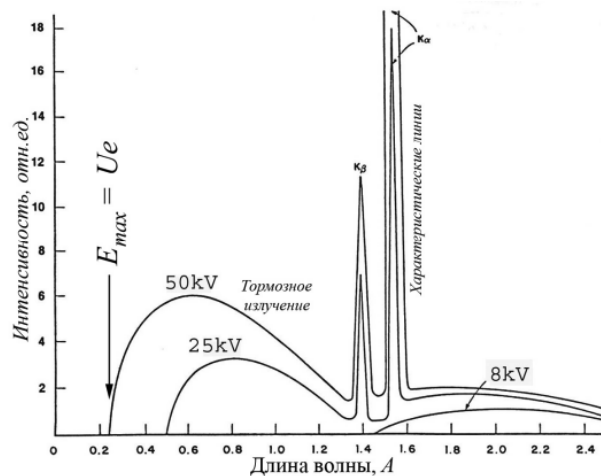


Рисунок 3 — типовой спектр рентгеновского излучения

однако его параметры варьируются при помощи изменения прикладываемой разности потенциалов, а верхняя граница находится дальше, чем для гамма-излучения.

### 1.3 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Взаимодействие ИИ с веществом зависит от типа излучения, а также его энергии. Поскольку ИИ является потоком определенных частиц, то результирующая картина может складываться из отдельных актов взаимодействия переносчиков с атомами вещества. Вместе с тем, при относительно низких энергиях полезным может быть и подход, связанный с рассмотрением взаимодействия как непрерывного процесса.

Рассматривая рентгеновское излучение энергией менее 1.022 МэВ, мы можем выделить два основных вида взаимодействия (не считая побочные эффекты в виде отражения, преломления, интерференции, флюоресценции и т.п.) [6]:

#### 1) Поглощение

Предполагая, что доля излучения, поглощенного в тонком слое  $\delta x$  вещества, пропорциональна толщине этого слоя, можно получить следующий закон поглощения рентгеновских лучей:

$$\frac{dI}{I_0} = -\mu dx,$$

Здесь  $\mu(Z, E)$  – линейный коэффициент ослабления, зависящий от элементного состава среды  $Z$  и энергии излучения  $E$ . Тогда интенсивность ослабленного луча задается выражением:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (1.1)$$

## 2) Рассеяние

Эксперименты по измерению интенсивности рентгеновских лучей вокруг просвечиваемого слоя показывают, что кроме основного луча из просвечиваемого слоя также наблюдаются лучи, не совпадающие с ним по направлению. Такие лучи называют *рассеянными*. В зависимости от энергии возможно два канала рассеяния: когерентное (томсоновское) и некогерентное (комптоновское). При низких энергиях излучения преобладает именно когерентный канал.

Из теории Томсона известно, что для единичного акта взаимодействия электрона и кванта излучения верна формула:

$$\sigma_e^{(1)} = \frac{I_r^{(1)}}{I_0} = \frac{8\pi e^4}{3m^2 c^2} \quad (\text{в СГС})$$

Отсюда можем получить линейный коэффициент рассеяния (по аналогии с линейным коэффициентом поглощения):

$$\sigma = Zn \frac{8\pi e^4}{3m^2 c^2},$$

где  $Z$  - порядковый номер химического элемента вещества,  $n$  - концентрация атомов в веществе,  $e, m$  - заряд и масса электрона соответственно.

Выражение для интенсивности рассеянных рентгеновских лучей:

$$I_r(x) = I_0(1 - e^{-\sigma x}) \quad (1.2)$$

Заметим, что коэффициент рассеяния входит в коэффициент ослабления по определению последнего.

Все указанные величины были введены для монохроматического излучения. Однако исходно рентгеновское излучение является немонахрома-

тическим, поэтому для получения полных эффектов взаимодействия требуется проинтегрировать формулы (1.1) и (1.2) с энергетическим спектром исходного излучения:

$$I(x) = \int \frac{dI_0}{dE} e^{-\mu(E)x} dE \quad (1.1^*)$$

$$I_r(x) = \int \frac{dI_0}{dE} (1 - e^{-\sigma(E)x}) dE \quad (1.2^*)$$

Рассмотрим теперь взаимодействие  $\gamma$ -квантов с веществом. Для монохроматического  $\gamma$ -излучения верна та же формула ослабления интенсивности. В основном выделяется 3 механизма (в диапазоне энергий, соответствующем прикладным задачам) [7]:

### 1) Комптоновское рассеяние

Это процесс рассеяния гамма-квантов на свободных электронах вещества (или на внешних оболочках), в результате которого часть энергии  $E_\gamma$  передаётся электрону, а квант с уменьшенной энергией  $E'_\gamma$  продолжает движение в другом направлении. Как было отмечено ранее, этот процесс также возможен для рентгеновских лучей (для коротковолновой части спектра).

Энергия гамма-кванта после рассеяния задается формулой:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos\theta)},$$

где  $\theta$  - угол рассеяния гамма-кванта. Сечение процесса (на одном электроном) же задается формулой Клейна-Нишины-Тамма [8]:

$$\sigma_k = 2\pi r_e^2 \left( \frac{1 + \epsilon}{\epsilon^2} \left( \frac{2 + 2\epsilon}{1 + 2\epsilon} - \frac{\ln(1 + 2\epsilon)}{\epsilon} \right) + \frac{\ln(1 + 2\epsilon)}{2\epsilon} - \frac{1 + 3\epsilon}{(1 + 2\epsilon)^2} \right),$$

где  $\epsilon = E_\gamma/mc^2$

### 2) Фотоэффект

Это процесс полного поглощения гамма-кванта электроном с атомной оболочки, в результате чего электрон высвобождается с кинетической энергией, равной разности энергии падающего излучения  $E_\gamma$  и энергии связи  $E$ . Приблизительно зависимость атомного сечения фото-

тоэфекта от энергии гамма-кванта задается выражениями:

$$\begin{cases} \sigma_f \propto \frac{Z^5}{E_\gamma^{7/2}}, E_\gamma > E_K \\ \sigma_f \propto \frac{Z^5}{E_\gamma}, E_\gamma \gg E_K \end{cases}$$

### 3) Рождение электрон-позитронных пар

Это процесс взаимодействия высокоэнергетического гамма-кванта с ядрами вещества посредством электромагнитного поля, приводящее к исчезновению кванта и образованию пары из электрона и позитрона. Процесс рождения пар является пороговым, то есть возможен только для излучения с энергией не ниже  $2mc^2 = 1.022$  МэВ. Его сечение имеет следующую зависимость от энергии:

$$\sigma_p \propto Z^2 \ln E_\gamma$$

Полный коэффициент ослабления задается суммой по всем этим процессам:

$$\mu(Z, E) = \sigma_k(Z, E) + \sigma_f(Z, E) + \sigma_p(Z, E) \quad (1.3)$$

В разных энергетических диапазонах преобладают разные процессы, поэтому зависимость коэффициента  $\mu$  от энергии имеет сложный характер (рисунок 4).

## 1.4 ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПРИБОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ИОНИЗИРУЮЩЕМ ИЗЛУЧЕНИИ (НА ПРИМЕРЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ)

В металлургической промышленности зачастую стоит задача контроля уровня расплава металла или сыпучего вещества в резервуаре, формы горячего проката и прочих характеристик, которые в процессе работы меняются динамически. На основании текущих показаний требуется принимать решение (человеком или АСУ ТП) о подстройке процесса для стабилизации параметров. Соответственно, ключевое требование к прибору

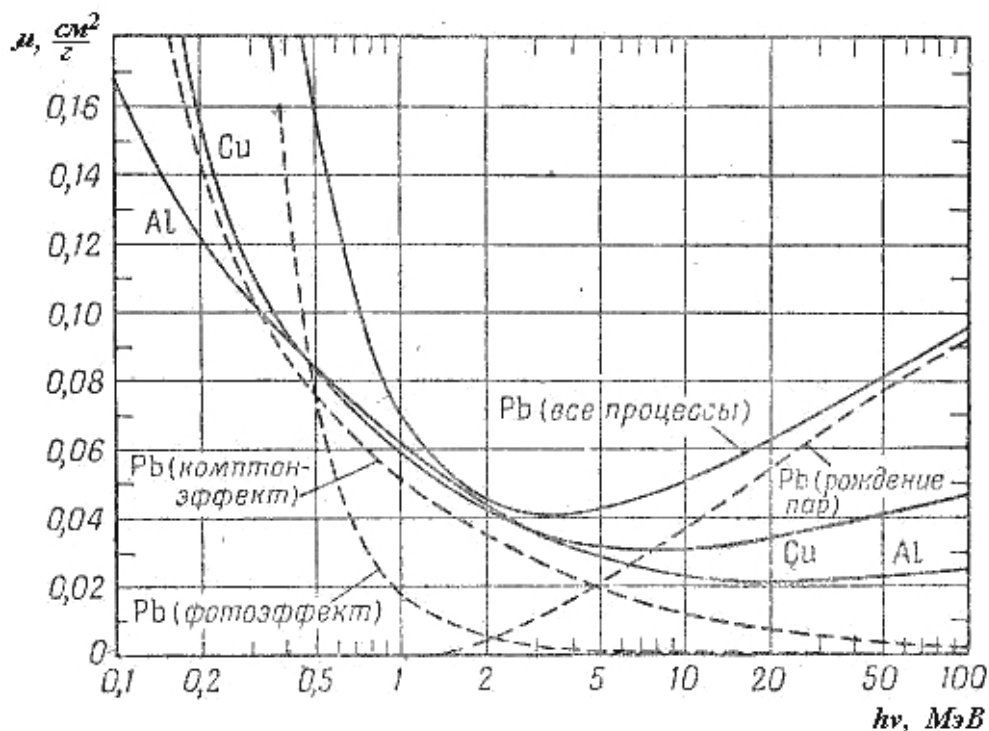


Рисунок 4 — зависимость сечений процессов от энергии в разных веществах

технологического контроля — быстроедействие в режиме on-line. Кроме того, условия в цеху могут иметь высокую амплитуду колебаний в течение года (в первую очередь, речь идет о температуре). То есть прибор должен работать в широком диапазоне внешних условий.

С точки зрения применяемых детекторов излучений хорошим оптимумом в данной ситуации могут быть сцинтилляционные детекторы (кристаллические) с фотоприемником в виде матрицы фотодиодов в токовом режиме или кремниевых фотоумножителей при дополнительной подстройке источников напряжения для компенсации температурного хода скорости счета (далее в работе называется — *термокомпенсация*).

Рассмотрим принцип работы таких приборов на примере уровнемера расплава в кристаллизаторе машин непрерывного литья заготовок [9].

Целевым параметром такого прибора является уровень расплава — или, что то же самое, положение границы раздела сред расплав-воздух. Определить эту границу можно по скорости счета, фиксируемой детектором в каждый момент времени. Излучение ослабляется по-разному в воздухе и расплаве в силу различных значений коэффициента  $\mu$ . Таким образом, по мгновенному значению скорости счета детектора при фиксированной геометрии кристаллизатора можно определить соотношение между

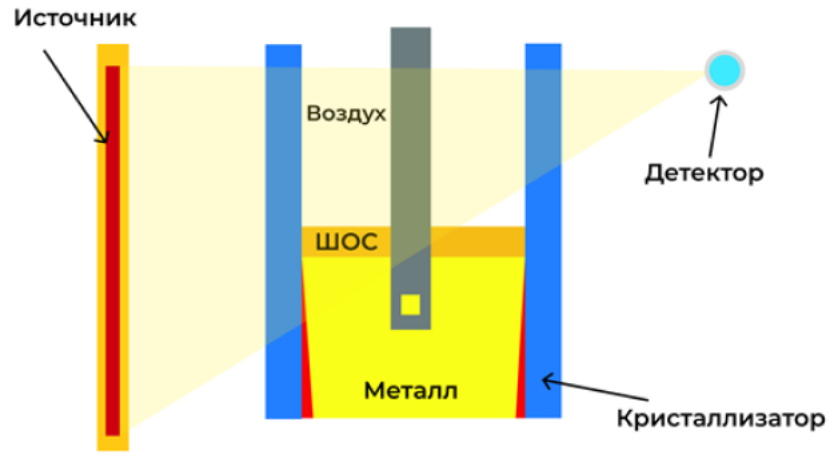


Рисунок 5 — схема работы уровнемера в кристаллизаторе МНЛЗ

воздухом и расплавом – а оттуда получить абсолютное значение уровня. Использовать в такой схеме необходимо  $\gamma$ -излучение для обеспечения определенности коэффициентов  $\mu$  (напомним, они зависят от энергии, поэтому ослабление будет строго экспоненциально только для монохроматического излучения). Примерная математическая модель строится следующим образом.

Ищем функцию  $I(h)$  - зависимость скорости счета в детекторе от уровня расплава. Будем считать, что  $x = 0$  соответствует нижнему краю источника излучения, а  $x = L$  – верхний край источника, где также расположен детектор. Кроме того, в дальнейших расчетах пренебрегаем ослаблением в конструкции кристаллизатора и детектора – они дадут постоянные множители в конечный ответ.

Выделим бесконечно малый элемент источника  $\delta x$  на уровне  $x$ . Полную интенсивность его излучения можно считать  $\delta A = \frac{A}{L} \delta x$ . Детектором регистрируется при этом дифференциальная интенсивность, приходящаяся на единицу площади строго в направлении детектора (его размеры будем считать  $\Delta S = \frac{\Delta S}{r(x)^2}$ ). Тогда выражение для летящего в сторону детектора излучения будет иметь вид:

$$\delta I(x) = \frac{d(\delta A)}{d\Omega} \Delta \Omega = \frac{\Delta S}{r(x)^2} \frac{d(\delta A)}{2\pi \sin\theta d\theta} \quad (1.4)$$



С учетом,  $r(x) = \sqrt{d^2 + (L - x)^2}$  и определения  $\delta A$ , подставляя в (1.4):

$$\delta I(x) = \frac{\Delta S}{d^2 + (L - x)^2} \frac{dA}{d\Omega} \frac{\delta x}{L}$$

Считая распределение интенсивности однородным по телесному, получим:

$$\delta I(x) = \frac{\Delta S}{L} A_\Omega \frac{\delta x}{d^2 + (L - x)^2} \quad (1.4^*)$$

Однако этот пучок излучения пролетает через некоторый слой расплава и воздуха. Найдем путь в обеих средах из геометрических соображений: путь вдоль кристаллизатора по расплаву составляет  $h - x$  (или 0 при  $x \geq h$ ), а вдоль воздуха  $d - h$ . Соответственно, из подобия треугольников:

$$\begin{aligned} \frac{S_{metal}(h, x)}{S_{air}(h, x)} &= \frac{h - x}{d - h} \implies \\ S_{air}(h, x) &= r(x) \frac{d - h}{d - x}, \quad S_{metal}(h, x) = r(x) \frac{h - x}{d - x} \end{aligned}$$

С учетом этого и (1.4\*), получим выражения для фиксируемой в детекторе интенсивности:

$$\delta I_d^{(1)}(h, x) = \frac{\Delta S}{L} A_\Omega \frac{\delta x}{d^2 + (L - x)^2} e^{-\sqrt{d^2 + (L - x)^2} (\mu_{air} \frac{d - h}{d - x} + \mu_{metal} \frac{h - x}{d - x})} \quad (1.5)$$

Для пучка, который летит строго через воздух, вклад получится:

$$\delta I_d^{(2)}(h, x) = \frac{\Delta S}{L} A_\Omega \frac{\delta x}{d^2 + (L - x)^2} e^{-\sqrt{d^2 + (L - x)^2} \mu_{air}} \quad (1.6)$$

Остается проинтегрировать выражение (1.5) по  $x \in (0, h)$  и (1.6) по  $x \in (h, L)$ , чтобы получить итоговую реакцию детектора:

$$I(h) = \int_{x=0}^{x=h} \delta I_d^{(1)}(h, x) + \int_{x=h}^{x=L} \delta I_d^{(2)}(h, x) \quad (1.7)$$

Взять эти интегралы в элементарных функциях не удастся, но в реальности аналитическое выражение и не требуется – достаточно рассчитать таблицу значений функции с шагом, не превышающим номинальной точности прибора.

Отметим, что это лишь простейший и очень модельный случай – для реального использования подобная формула должна учитывать неоднородность углового распределения излучения, эффекты на границе раздела сред, конкретные характеристики детекторов и многое другое.

Кроме того, можно усложнять саму схему получения данных. Так, например, для разделения многофазной смеси можно использовать не один детектор, а линейку – и анализировать уже целый вектор скоростей счета, то есть пространственное распределение интенсивности. Это даст возможность найти не одну границу раздела фаз, а сразу несколько (пример такого прибора приведен на рисунке 6).

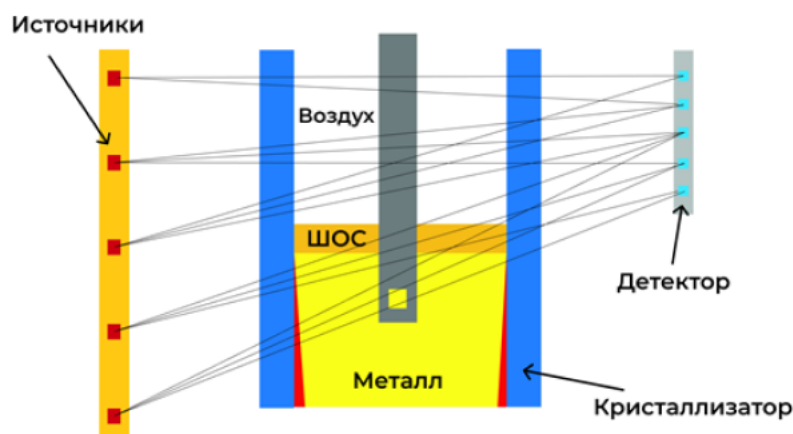


Рисунок 6 – схема работы уровнемера усложненного образца

Если рассматривать упрощенное устройство – например, сигнализатор уровня (гамма-реле) – то анализ данных значительно упрощается. Реле должно замыкаться при превышении уровня относительно заданного значения, что можно определить по резкому падению скорости счета при перекрывании промежутка между детектором и источником слоем расплава (т.к.  $\mu_{metal} > \mu_{air}$ ). Устанавливая порог срабатывания в промежутке между скоростями счета в чисто воздушном и полностью заполненном металлом состояниях, можно обеспечить высокую достоверность работы сигнализатора.

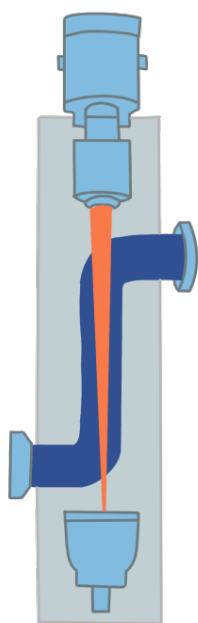
## 2 ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА

### 2.1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Рассмотрим теперь подробно процессы и условия, в рамках которых будут использоваться разрабатываемые приборы. На данный момент рассматривается три контекста:

- 1) Применение сигнализаторов уровня для контроля потоков в трубопроводах

В производстве зачастую требуется контролировать концентрацию веществ, для чего на трубопроводы устанавливают *плотномеры* – приборы, измеряющие плотность веществ и по ней соотношения долей заданных компонентов раствора.



(а)



(б)

Рисунок 7 — схема работы плотномера (а) и фотография смонтированного прибора на ЧерМК (б)

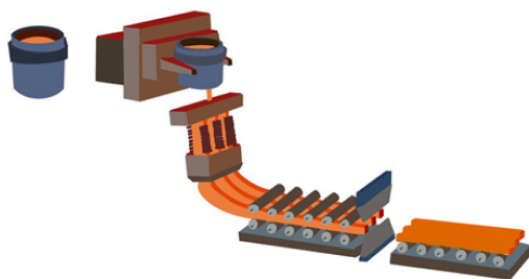
Характерные условия работы и требования к исполнению:

- диапазон показаний плотности:  $(1000; 2000) \text{ кг/м}^3$ ;

- предел основной допускаемой погрешности измерения во всем интервале значений: не более  $\pm 1\%$ ;
- температура окружающей среды: от  $+10$  до  $+50$   $^{\circ}\text{C}$ ;
- относительная влажность окружающей среды от 0 до 95 %;
- температура внешней стенки трубопровода:  $300$   $^{\circ}\text{C}$ ;
- материал стенки: сталь;
- толщина стенки: (3; 10) мм;
- диаметр трубопровода: (100; 150) мм;
- габаритные размеры: не более  $\varnothing 80$  и  $H 150$ .

2) Применение уровнемеров и сигнализаторов уровня для поддержания постоянного уровня расплава в кристаллизаторах МНЛЗ и резервуарах

Схема работы уровнемеров и гамма-реле была подробно описана в разделе 1.4.



(а)



(б)

Рисунок 8 — схема ручьев МНЛЗ (а) и фотография МНЛЗ на ТАГМЕТ (б)

Отметим существенные условия работы:

- температура окружающей среды: от  $-40$  до  $+90$   $^{\circ}\text{C}$ ;
- относительная влажность окружающей среды от 0 до 95 %;
- температура внешней стенки емкости:  $300$   $^{\circ}\text{C}$ ;
- материал стенки: сталь/жаропрочный кирпич;
- толщина стенки: (10; 400) мм;

- габаритные размеры: не более  $\varnothing 80$  и  $H 300$ .

Отметим, что именно сигнализатор уровня выбран в качестве исходного прибора для прототипирования в связи с простой механизма работы и упрощенными технологическими требованиями.

3) Использование профилемеров горячего проката на Стане-2000 Череповецкого металлургического комбината

*Профилемер* – прибор для комплексного анализа характеристик проката металла: толщины, крутизны, высоты и прочих, а также снятия полного профиля поверхности. Структура типового профилемера (на примере Thermo Scientific SIPRO) представлена на рисунке 9. Профи-

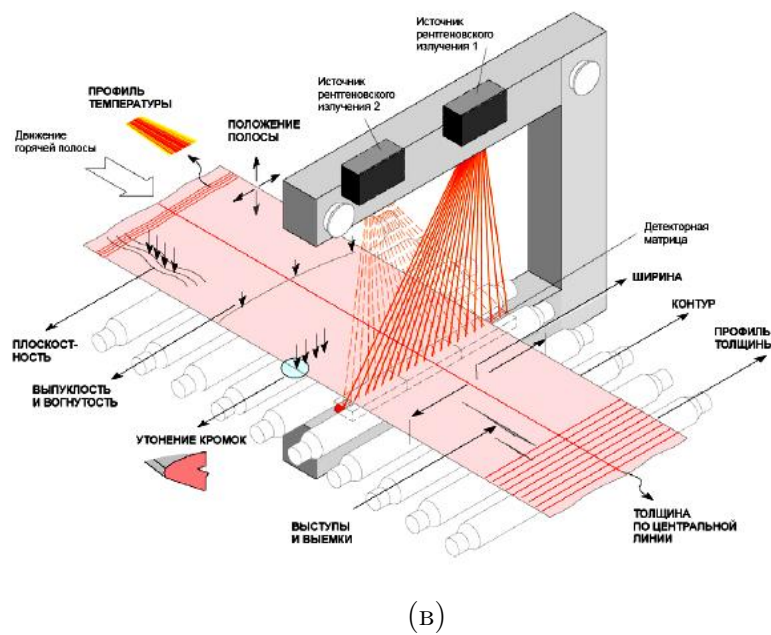
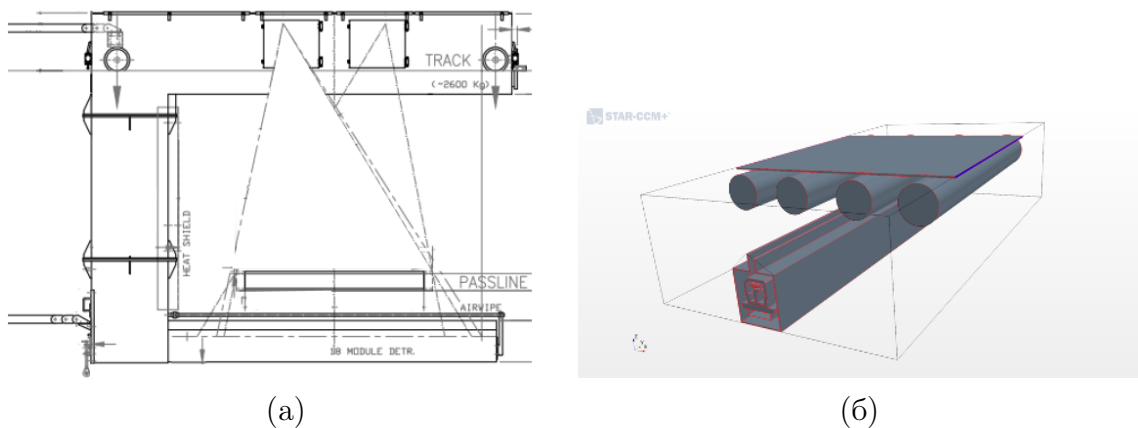


Рисунок 9 — схема С-рамы профилемера с рентгеновскими источниками (а), геометрия детектирующей части (б) и схема работы профилемера (в)

лемеры используют несколько рентгеновских излучателей и матрицу

детекторов, а также анализируют динамическое распределение излучения в пространстве с учетом множества вторичных эффектов. Поэтому их разработка является наиболее сложной и требует проведения большого числа научно-исследовательских работ.

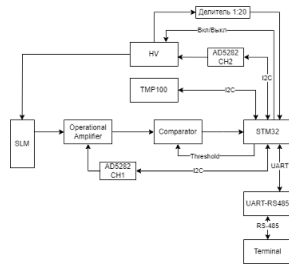
## 2.2 ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПА ГАММА-РЕЛЕ

Принцип работы гамма-реле (сигнализатора уровня) был описан в разделе 1.4. В соответствии с общей схемой АСУ ТП, кратко представленной во введении, было принято решение структурно разделить сигнализатор на две отдельные части:

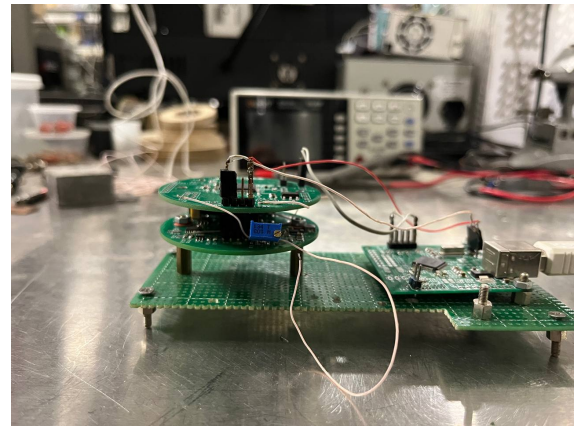
- Блок детектирования – блок, содержащий все необходимые датчики (термометр, детектор излучения) и необходимую электронику (в основе лежит микроконтроллер STM32). Этот элемент будет находиться непосредственно в зоне производства, соответственно, имеет повышенные требования к стойкости и термической изоляции корпуса.
- Блок обработки информации – компьютер/микроконтроллер, подключающийся к БД по протоколу RS-485 и непосредственно обрабатывающий поступающие данные. Кроме того, этот блок конфигурирует микроконтроллер БД и обеспечивает представление результатов измерений оператору. Технологически БОИ находится в специальном помещении, удаленном от зоны производства, поэтому требования на стойкость к внешним условиям у него понижены (относительно БД).

В составе детектора используется кристаллический сцинтиллятор NaI(Tl) (цилиндр размером 50x50 мм), а также матрица из 4 SiPM 6x6 мм. Источник излучения –  $^{137}\text{Cs}$ . Структурная схема электроники представлена на рисунке 10.

Здесь HV – источник питания SiPM (рабочая область: (28; 30) В), SLM – детектор излучения, Operational Amplifier – операционный усилитель (обеспечивает усиление сигнала с SiPM), Comparator – компаратор (сравнивает сигнал с порогом для отсеивания шумов), AD5282 – двухканальный ЦАП для регулировки параметров (усиление ОУ и напряжение



(a)



(б)

Рисунок 10 — электронная схема БД: структурная блок-схема (а) и внешний вид итоговой платы (б)

на HV), TMP100 – термометр, STM32 – управляющий микроконтроллер STM32F446RET6 LQFP64.

Причиной использования полудуплекса RS-485 является требование высокой протяженности кабеля: БОИ и БД будут удалены друг от друга на расстояние порядка 150-200 м. Применение же токовой петли 4-20 мА или аналогичных методов может привести к нежелательным наводкам.

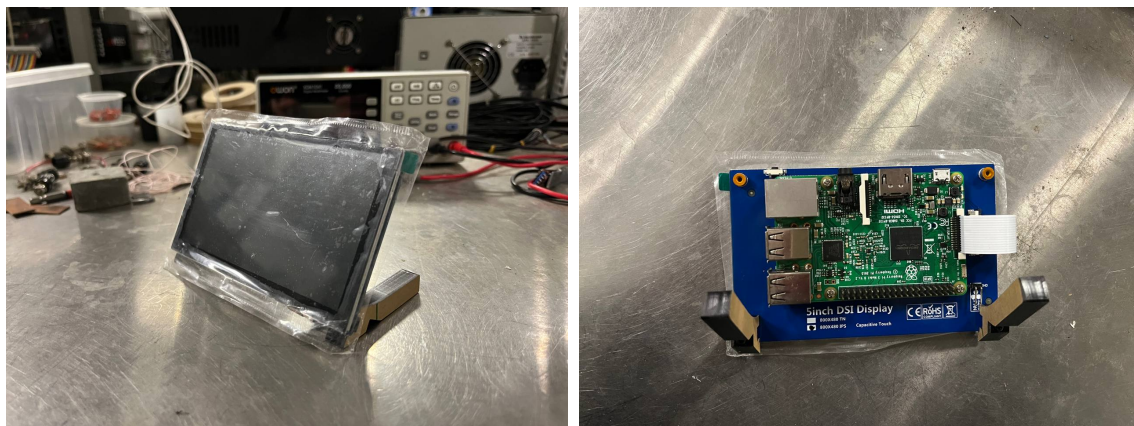
# 3 РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА БЛОКА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

## 3.1 ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ

В соответствии с рассмотренной в разделе 2.2 структурой сигнализатора уровня для БОИ был сформулирован следующий функционал:

- коммуникация с БД посредством последовательного порта;
- сбор значений с датчиков БД и их представление оператору;
- конфигурация БД в интерактивном режиме;

В качестве технической основы был выбран одноплатный компьютер Raspberry Pi – такой выбор позволяет использовать эффективный планировщик задач ОС Linux и простой доступ к графическим интерфейсам и оборудованию при помощи интерпретируемых языков программирования высокого уровня (в нашем случае, Python3). Для взаимодействия с пользователем используется сенсорный дисплей диагональю 5" для обеспечения компактности БОИ и быстрого доступа к нужным настройкам.



(а)

(б)

Рисунок 11 — внешний вид прототипа БОИ (дисплей и корпус: а, компьютер: б))

В настоящий момент обмен данными между БД и БОИ происходит по протоколу USB в целях отладки процесса работы. В ближайшей перспективе планируется переход на RS-485, который будет использоваться в рабочем режиме.



## 3.2 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

В качестве языка программирования, как было отмечено в предыдущем разделе, был выбран интерпретируемый язык высокого уровня Python3 (версии 3.12). Выбор обусловлен высокой гибкостью языка и практически независимостью от используемой физической платформы, а также существующим заделом по разработке интерактивных программ для экспериментальных стендов (в рамках бакалаврской дипломной работы был разработан ПК для диджитайзеров CAEN DT57xx, позволяющий производить комплексный анализ данных и визуализацию в реальном времени).

Программный комплекс, разработанный для БОИ, состоит из двух структурных блоков:

- 1) Интерфейс на языке Python для объектно-ориентированного управления подключенным устройством (далее будем сокращенно называть *драйвер*).
- 2) Графический интерфейс, адаптированный под сенсорные экраны, для обеспечения взаимодействия с пользователем.

### I. Драйвер устройства с кодовым названием GammaDevice

В качестве основы для взаимодействия с устройством по последовательному порту использовалась наиболее популярная и стабильная библиотека `serial`. Она является посредником между ОС и пользовательскими командами, позволяя считывать и отправлять в порт байтовые пакеты.

Структура драйвера представлена на схеме 12.

Отдельно отметим особенности реализации вспомогательных потоков. Функции `update_loop()` и `read_loop()` реализуют бесконечные циклы для отправки сигналов обновления значений и считывания актуальных параметров БД. Данные методы работают исключительно в многопоточном режиме, что приводит к, с одной стороны, повышенному использованию ресурса процессора, а с другой стороны, повышению быстродействия программы и существованию возможности асинхронности действий между пользовательскими командами и внутренней логикой драйвера. Все остальные методы класса также адаптированы под использование в многопоточном режиме (в первую очередь, имеется ввиду блокировка чтения/записи для гарантии валидности данных).

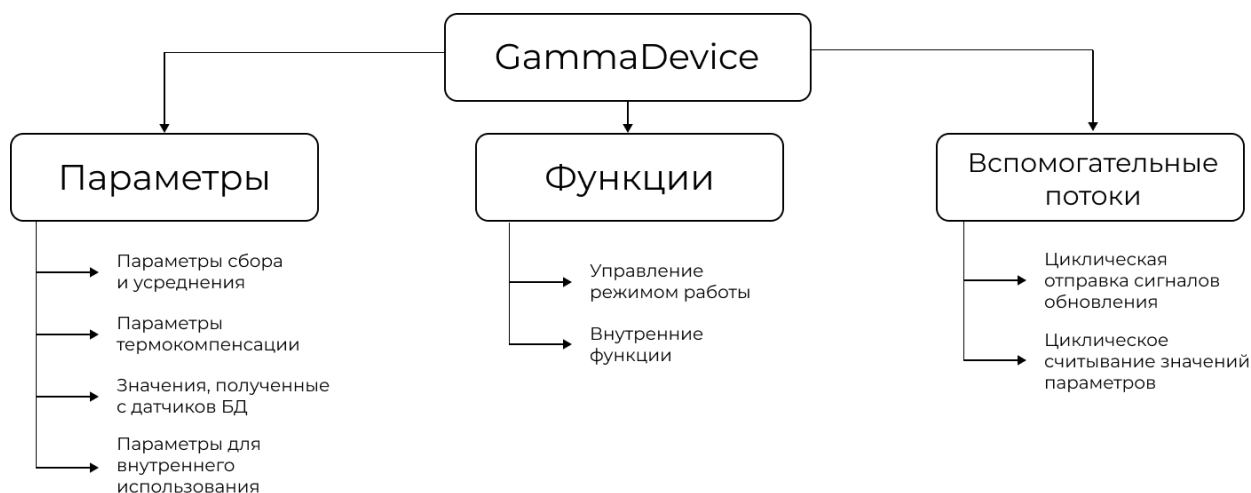


Рисунок 12 — структурная схема драйвера GammaDevice

## II. Графический интерфейс «GammaClient»

В соответствии с ТЗ к БОИ была сформирована следующая схема графического интерфейса пользователя (на рис. 13). Интерфейс был реализован при помощи стандартной библиотеки `tkinter`. Выбор обусловлен тремя факторами:

- низкие требования к ресурсам компьютера и относительное быстродействие;
- отсутствие необходимости использования дополнительных внешних библиотек;
- совместимость с любой ОС и любой физической базой.

Глобально интерфейс разделен на три контекста:

- Стандартный контекст оператора: отображение основных параметров и управление состоянием реле.
- Управление внешним видом и поведением панели оператора.
- Администрирование и конфигурация работы БД (защищено паролем администратора).

Внешний вид прототипа БД и БОИ представлен на рисунке 14.

### 3.3 АНАЛИЗ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ

Как было отмечено в разделе 2.1, важной особенностью технологических процессов является большой разброс температур, в который должны

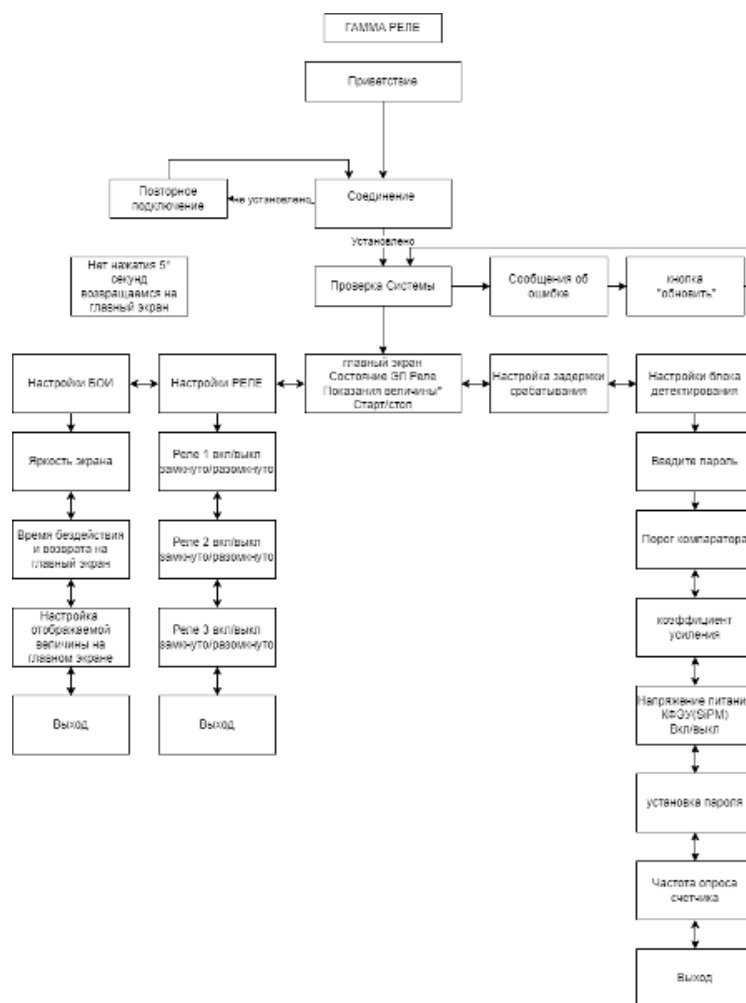


Рисунок 13 — структурная схема графического интерфейса GammaClient

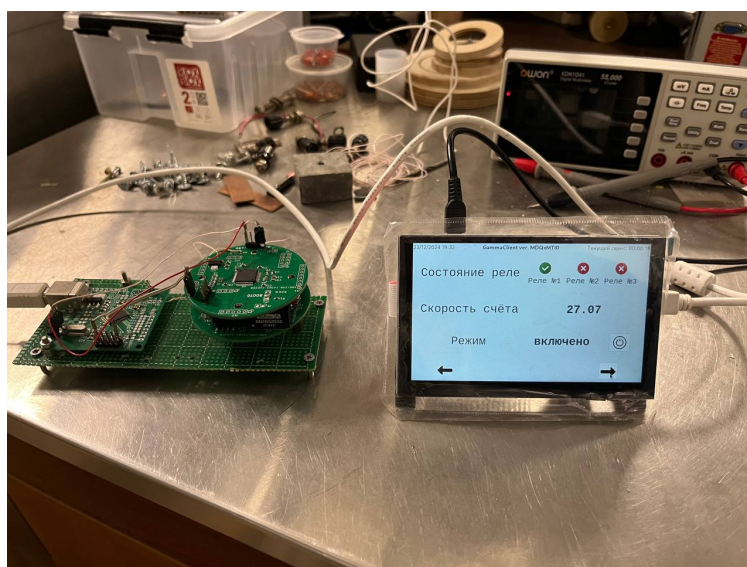


Рисунок 14 — сборка БД и БОИ (вне корпуса)

работать приборы. Разные составные элементы по-разному реагируют на температурный ход и дают свои побочные эффекты. В рамках настоящей работы мы рассмотрим *термокомпенсацию* (то есть введение поправок,

вычисляемых по значению температуры), связанную с температурным ходом источника питания SiPM (см. раздел 2.2 об электронной схеме БД). Необходимость стабилизации подаваемого напряжения связана с высокой чувствительностью SiPM (точнее, процессу образования лавин в фотодиодах) к его флуктуациям. Скорость счета должна оставаться примерно постоянной (с учетом пуассоновской погрешности  $\sqrt{N}$ ) в рамках одного и того же состояния резервуара независимо от температуры. Даже более критичным этот вопрос будет являться для приборов, определяющих конкретные значения параметров.

Согласно технической документации, поставляемой с источником питания, зависимость создаваемой разности потенциалов от температуры имеет угловой коэффициент  $K_V = 22 \frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C}}$ . Соответственно, значение напряжения (с учетом поправки) должно линейным образом зависеть от температуры:

$$U_V = K_V t + B, \quad (3.1)$$

где  $B$  – постоянный сдвиг, равный рабочему значению напряжения при  $0^\circ\text{C}$ ,  $U_V$  – значение напряжения в Вольтах. Заметим, однако, что напряжение на источнике задается при помощи ЦАП в виде цифрового кода. Таким образом, требуется определить функцию перевода из аналогового значения в  $B$  в цифровой код.

На первый взгляд, зависимость должна быть линейной. Однако экспериментально было установлено, что это не так – эффективная передаточная характеристика имеет нелинейный характер. Связано это с использованием делителя напряжения – его характеристика также нелинейна. Вид кривой был определен при помощи фитирования экспериментально снятой зависимости напряжения при разных сдвигах  $B$  (вернее, его цифровом значении) и  $K_U = 0$  – она представлена на рисунке 15.

Самый младший полином, эффективно аппроксимирующий зависимость в указанном диапазоне, имел 3 степень. Получившаяся прямая и обратная характеристика имеет вид:

$$\begin{cases} U = 4.67\left(\frac{D}{255}\right)^3 + 1.78\left(\frac{D}{255}\right)^2 + 8.62\left(\frac{D}{255}\right) + 18.87 \text{ (V)} \\ D = 255 * \left[4.51\left(\frac{U}{34}\right)^3 - 13.44\left(\frac{U}{34}\right)^2 + 14.75\left(\frac{U}{34}\right) - 4.82\right] \end{cases} \quad (3.2)$$

График зависимости напряжения с АЦП от установленного цифрового кода

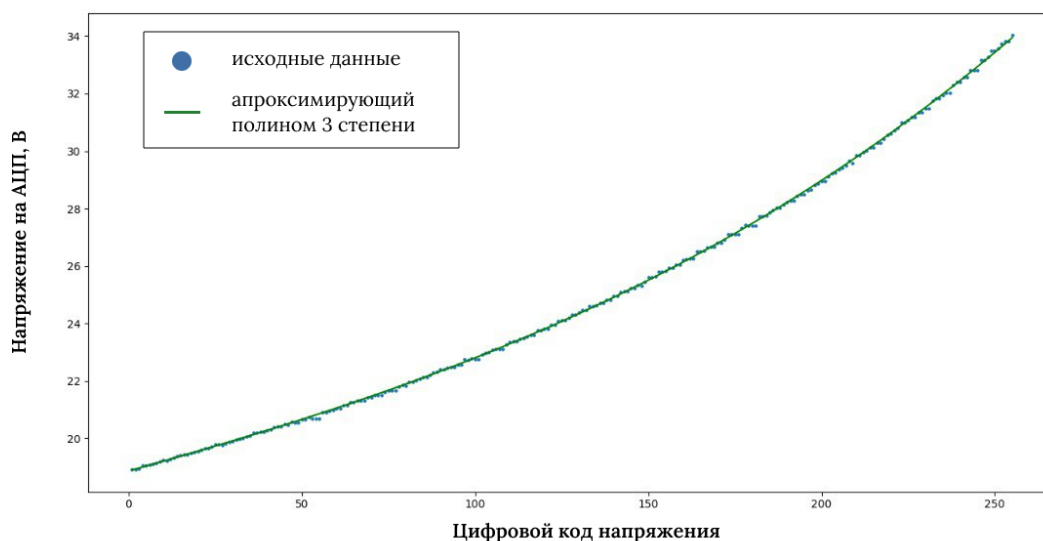


Рисунок 15 — график зависимости напряжения (в В) от цифрового кода

Здесь  $D$  – цифровой код напряжения,  $U$  – значение напряжения в В. Осталось перевести линейную зависимость  $U = K_U t + B$  в зависимость  $D(t)$  через передаточную функцию и подобрать соответствующие значения параметров. Подбор значений проведем вновь численным методом.

По формуле (3.1) определим оптимальное значение напряжения при данной  $t$ , а затем по обратной градуировочной кривой определим соответствующий цифровой код на ЦАП. И для определения коэффициентов произведем аппроксимацию зависимости прямой. Результаты данной процедуры представлены на рисунке 16.

А значения параметров:

$$K_D = 0.3 \frac{1}{\text{oC}}, \quad B_D = 179.5, \quad (3.3)$$

где  $K_D$  и  $B_D$  – коэффициенты линейной зависимости в цифровом коде.

Термокомпенсация с полученными значениями была протестирована в термокамере и подтверждена ее работоспособность: скорость счета остается в рамках одного диапазона независимо от температуры окружающей среды.

График зависимости оптимального цифрового кода от температуры

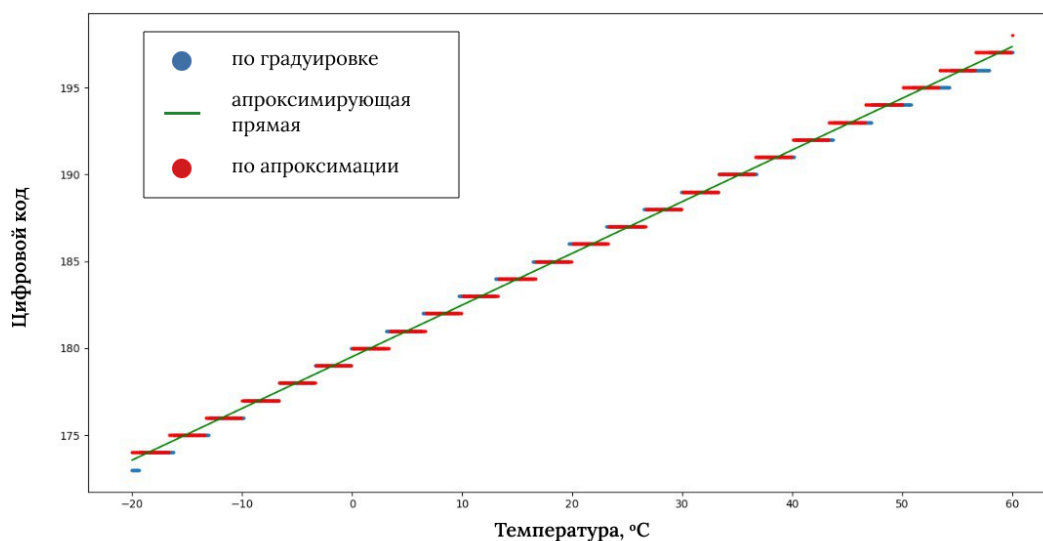


Рисунок 16 — график зависимости оптимального цифрового номера от температуры

## 4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного этапа настоящей НИР проводились работы по разработке блока обработки информации для прототипа сигнализатора уровня на радиоизотопном принципе для использования на производственных линиях ЧерМК ПАО «Северсталь».

Был проведен анализ внешних факторов, потенциально влияющих на работу БОИ, и на основе анализа, а также существующих требований к функционалу, были приняты решения по использованию тех или иных комплектующих и программ.

Был разработан программный комплекс, состоящий из интерфейса взаимодействия с микроконтроллером блока детектирования на языке программирования Python3 и пользовательского интерфейса на основе библиотеки `tkinter`. При помощи настоящего ПК была также проведена отладка прошивки микроконтроллера.

Наконец, по итогам анализа передаточных характеристик ЦАП и делителя напряжения в составе электронной схемы БД, были определены оптимальные коэффициенты термокомпенсации. Возможность использования прибора с данными значениями была подтверждена в первом приближении в лабораторных условиях.

При этом, работа над программным комплексом блока обработки информации еще не завершена. Предстоит провести опытно-промышленные испытания, получить обратную связь по функционалу ПК, а также доработать прототип до минимально жизнеспособного продукта. Полученные в рамках данного этапа результаты будут применяться при разработке последующих приборов, а также в рамках исследовательских работ по разработке профилемера горячего проката.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Федоров Ю.* Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. Том 1. — ЛитРес, 2022. — ISBN 9785457651814.
2. *Мёрман Д., Шмид Й., Спагнул С.* Быстрое и точное определение уровня металла в кристаллизаторах машин непрерывного литья // Черные металлы. — 2012. — № 3. — С. 53–61.
3. *Черняев А. П.* Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. — Физматлит, 2004.
4. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М.* Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. — МГУ, 1979.
5. *Никитенков Н. Н.* Технология конструкционных материалов. Анализ поверхности методами атомной физики. — Общество с ограниченной ответственностью Издательство ЮРАЙТ, 2020.
6. *Павлинский Г.* Основы физики рентгеновского излучения. — Litres, 2022.
7. *Качан С.* Взаимодействие гамма-излучения с веществом. — 2014.
8. *Huston J.* The Compton Effect. — 2008. — URL: [https://web.pa.msu.edu/people/huston/phy192\\_s08/compton.pdf](https://web.pa.msu.edu/people/huston/phy192_s08/compton.pdf) ; Дата обращения: 21.12.2024.
9. *Гуидо М.* ; СМС КОНКАСТ АГ. Устройство для определения и отображения различных уровней металлического расплава. Заявка на изобретение №2012105034А РФ МПК G01F 23/00 №2012105034/28; Заявл. 14.02.2012; Оpubл. 20.08.2013 Бюл. №23.