

Лабораторная работа 6.1
Исследование резонансного поглощения
 γ -КВАНТОВ

Гарина Ольга
Б04-901

10 февраля 2022 г.

Содержание

1	Экспериментальная установка	3
2	Теоретическое введение	4
3	Результаты	7
3.1	Измерение спектра источника	7
3.2	Измерение резонансного поглощения	7
4	Вывод	8
5	Литература	9
6	Приложение	10

Цель работы: С помощью доплеровского сдвига мессбауэровской линии поглощения исследовать резонансное поглощение γ -лучей, испускаемых ядрами олова ^{119}Sn в соединении BaSnO_3 при комнатной температуре. Определить положение максимума резонансного поглощения, его величину, а также ширину линии .

1 Экспериментальная установка

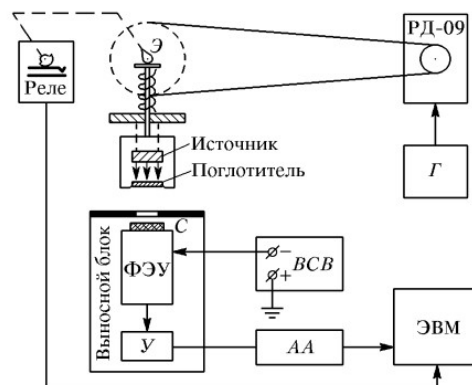


Рисунок 1 – Блок-схема установки для наблюдения эффекта Мессбауэра: Э – эксцентрик, С – сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) , У – усилитель, АА – одноканальный амплитудный анализатор, ЭВМ – персональный компьютер, Г – генератор для питания двигателя, РД-09 – двигатель с редуктором, ВСВ – высоковольтный стабилизированный выпрямитель

Блок-схема установки для наблюдения эффекта Мессбауэра приведена на рисунке 1. Поглотителем служит оловянная фольга. Она укреплена в рамке, которая приводится в движение кулачковым механизмом. Скорость перемещения поглотителя можно варьировать в диапазоне от 0,1 до 5 мм/с, меняя угловую скорость вращения эксцентрика при помощи двигателя с редуктором РД-09. Двигатель питается от специального генератора.

В данной работе в качестве источника γ -квантов используется радиоактивный изотоп олова ^{119}Sn в виде соединения BaSnO_3 . К источнику прикреплена палладиевая фольга толщиной 60 мкм для подавления фона, создаваемого рентгеновским излучением. Источник в металлическом контейнере укреплен неподвижно над поглотителем.

Для наблюдения эффекта необходимо выделить основную линию из общего излучения. Для этого нужно установить окно амплитудного анализатора спектрометра на фотопик линии 23,8 кэВ.

Сцинтилляционный спектрометр имеет тонкий кристалл NaI(Tl) , который хорошо поглощает излучение с энергией 20-30 кэВ и малочувствителен к γ -квантам больших энергий. Фотоэлектронный умножитель специально подобран и имеет малые собственные шумы.

Канал счета времени и канал счета импульсов на ЭВМ выведены на реле, управление которым ведется от тефлоновых кулачков. Схема автоматически

включается на участке, где поглотитель движется с постоянной скоростью, и выключается, когда участок пройден. Абсолютное значение скорости поглотителя указывается на дисплее ЭВМ. Смена скорости или ее подбор производится путем изменения частоты генератора, питающего двигатель.

2 Теоретическое введение

Ядра атомов, которые находятся в возбужденном состоянии, испускают γ -кванты. Испущенный γ -квант должен иметь энергию, равную разности энергий возбужденного и основного состояний. Помимо испускания, ядра могут и поглощать фотоны. Поглощение или испускание γ -кванта имеет резонансный характер.

Стоит отметить, что энергия испущенного γ -кванта немного отличается от разности энергий двух уровней. Это обусловлено тем, что ядро, которое испускает γ -квант, приобретает импульс отдачи, по абсолютной величине равный импульсу γ -кванта. Если ядро изначально покоилось, то энергия отдачи

$$R = \frac{p^2}{2M} = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2}. \quad (1)$$

Рассмотрим ядро олова ^{119}Sn . Расстояние между первым возбужденным и основным уровнями равно $E_0 = 23,8$ кэВ. Тогда

$$R = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} \approx \frac{E_0^2}{2Mc^2} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{эВ}. \quad (2)$$

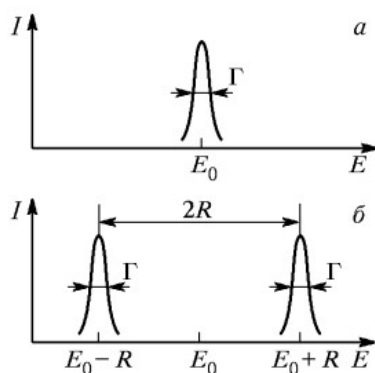


Рисунок 2 – а) Энергетическое распределение, характеризующее возбужденное состояние свободного ядра; б) Сдвиг линий испускания и поглощения из-за отдачи в свободных ядрах

Рассмотрим рисунок 1б. На нем изображен сдвиг линий испускания и поглощения из-за наличия отдачи. Левый пик при энергии $E_0 - R$ соответствует энергии кванта, который был испущен возбужденным ядром, а правый при $E_0 + R$ – энергии, которую должен иметь γ -квант, чтобы произошло резонансное поглощение с покоящимся свободным ядром.

В связи с этим фактом резонансное поглощение невозможно наблюдать повсеместно: если источник и поглотитель имеют одинаковые ядра, то из-за разницы в удвоенную энергию отдачи $2R$ не происходит поглощения γ -квантов поглотителем.

Резонансное поглощение γ -квантов возможно только в том случае, если спектры испускания и поглощения перекрываются, то есть при условии $2R \leq \Gamma$.

Данное неравенство почти никогда не выполняется для γ -квантов в свободных ядрах. Естественная ширина линии для олова ^{119}Sn равна $\approx 3 \cdot 10^{-8}$ эВ.

В реальных условиях ширина линии испускания и поглощения складывается из собственной ширины линии и ее доплеровской ширины. Из этих двух ширин наибольший вклад вносит именно доплеровская компонента, которая связана с тепловым движением атомов. Доплеровский сдвиг уровней D можно рассчитывать в нерелятивистском приближении, поскольку средняя тепловая скорость v атомов меньше скорости света c . Для оценок

$$D = \frac{v}{c} E_\gamma \approx \frac{v}{c} E_0. \quad (3)$$

так как $v \approx \sqrt{\frac{kT}{M}}$, то

$$D = 2\sqrt{RkT}. \quad (4)$$

Для ядер олова получаем оценку

$$D = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ эВ.}$$

В результате доплеровского уширения линии поглощения и испускания частично перекрываются, поэтому становится возможным наблюдение резонансного поглощения γ -квантов.

Теперь рассмотрим резонансное поглощение и испускание γ -квантов ядрами, которые находятся в кристаллической решётке. Энергии отдачи, которая достигается в нашей лабораторной работе, недостаточно, чтобы "вырвать" ядро из кристаллической решётки. Импульс отдачи передаётся всему кристаллу. В кристаллической решётке возбуждаются звуковые колебания – энергия отдачи передаётся фононам.

Эффект испускания и поглощения γ -квантов, который не сопровождается рождением фононов, называется эффектом Мёссбауэра. Вероятность эффекта Мёссбауэра равна

$$f = \exp\left(-4\pi^2 \frac{\langle u^2 \rangle}{\lambda^2}\right), \quad (5)$$

Здесь $\langle u^2 \rangle$ – среднеквадратичное смещение ядер в процессе тепловых колебаний решётки, а λ – длина волны γ -излучения.

В данной лабораторной работе эффект Мёссбауэра наблюдается на ядрах олова ^{119}Sn в кристалле BaSnO_3 . Гамма-излучение от источника пропускается через поглотитель, содержащий стабильные ядра ^{119}Sn . В поглотителе происходит взаимодействие фотонов как с ядрами, так и атомными электронами за счёт фотоэффекта и эффекта Комптона. Интенсивность прошедшего через поглотитель излучения изменяется на фактор

$$\exp(-n_e\sigma_e)\exp(-nf\sigma(E)), \quad (6)$$

где Здесь n_e и n – концентрации электронов и ядер поглотителя, σ_e и $\sigma(E)$ – сечение взаимодействия с электронами и сечение резонансного поглощения соответственно. Сечение $\sigma(E)$ описывается формулой Брейта-Вигнера

$$\sigma(E) \approx \frac{(\Gamma/2)^2}{(E - E_0)^2 + (\Gamma/2)^2}. \quad (7)$$

Наблюдение резонансного поглощения γ -лучей основано на методе доплеровского сдвига линий испускания и поглощения. Для создания этого сдвига поглотителю придаётся небольшая скорость v .

Если ядра источника и поглотителя находятся в идентичных кристаллах и при одинаковой температуре, то линия испускания перекрывается с линией поглощения и максимальное поглощение наблюдается при нулевой скорости. Максимум поглощения может наблюдаться на скорости v , отличной от нулевой. Для этого необходимо, чтобы поглотитель и источник были сделаны из разных химических соединений. Смещение максимума линии называется химическим сдвигом.

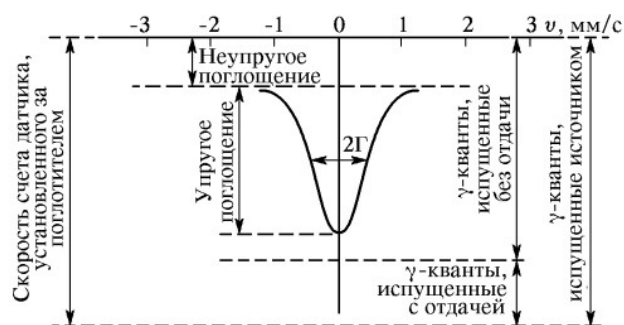


Рисунок 3 – Спектр упругого резонансного поглощения γ -квантов. Источник и поглотитель находятся в идентичных кристаллах (химический сдвиг отсутствует).

3 Результаты

Все графики можно найти в Приложении к данной работе.

3.1 Измерение спектра источника

1. В меню на экране компьютера установим время накопления данных 5 секунд и выберите режим "Начать эксперимент".
2. Переведем анализатор импульсов в режим измерения с фиксированным окном и установим ширину окна $U = 0,5$ В.
3. Снимем свинцовую заслонку с ФЭУ.
4. Проведём измерение спектра в диапазоне напряжений от 0 до 9,5 В. График зависимости интенсивности падающих на ФЭУ γ -квантов I от напряжения U представлен на рис. 4.

На графике (рис. 4) видна колоколообразная часть спектра. Колоколообразный максимум представляет собой аппаратно уширенную линию γ -квантов с энергией $E_\gamma = 23,8$ кэВ.

Переведем анализатор импульсов в режим с независимыми порогами и установим значения порогов такими, чтобы колоколообразный максимум оказался внутри выбранного интервала. Значения порогов: $LL = 3$ В, $UL = 8$ В.

3.2 Измерение резонансного поглощения

1. Выберем в главном меню раздел "Измерение спектров поглощения"
2. Установим в кассете один из четырех образцов.
3. В появившемся меню "Резонансное поглощение" установите ход поглотителя $d = 8,84 \pm 0,02$ и время измерения.
4. Измерим фон. Для этого в меню выберем раздел "Фон". Измерение производится при закрытом свинцовой заглушкой окне ФЭУ – оно необходимо для учёта случайных срабатываний детектора.
5. В меню "Резонансное поглощение" выберем раздел "Начать эксперимент".
6. Проведем серию измерений интенсивности потока γ -лучей при разных скоростях движения поглотителя. Скорость движения поглотителя определяется автоматически по заданной длине хода поглотителя и по измеряемому времени движения вверх или вниз. Скорость регулируется частотой генератора INSTRON.

7. По завершении измерений с выбранным поглотителем повторим аналогичные измерения для других образцов. Далее построим спектры резонансного поглощения γ -квантов в координатах $I(\nu)$. Графики зависимостей представлены на рис. 5-8.

В таблице 1 представлены результаты измерений.

Образец	d, мкм	$I_0, 10^4$	$\Delta\nu$, мм/с	$\Gamma, 10^{-7}$, эВ	ν_p , мм/с
1	90	0,17	1,51	1,19	$2,4 \pm 0,2$
2	180	0,12	1,25	0,99	$2,4 \pm 0,2$
3	310	0,07	1,5	1,19	$2,4 \pm 0,2$
4	-	0,71	1.54	1,22	$0 \pm 0,2$

Таблица 1 – Результаты эксперимента

4 Вывод

В данной работе удалось исследовать эффект Мессбауэра методом доплеровского сдвига. Была оценена ширина линии резонансного поглощения, а также найдена амплитуду пика резонансного поглощения для четырёх образцов, экспериментально определена величина химического сдвига. Результаты работы можно представить в виде таблицы 1. Среднее значение ширины линии

$$\Gamma = (1,15 \pm 0,18) \cdot 10^{-7} \text{ эВ.}$$

Среднее время жизни возбужденного состояния:

$$\tau \approx \frac{\hbar}{\Gamma} = (5,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Величина химического сдвига:

$$\nu_p = 2,4 \text{ мм/с} = 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ эВ.}$$

Возможные причины ошибок:

- Наличие аппаратного уширения, связанного с несовершенством экспериментальной установки, вибрациями источника и поглотителя
- Неравномерность скоростью перемещения поглотителя относительно источника
- Наличие уширения в результате самопоглощения квантов в источнике, если в нем имеются резонансно поглощающие ядра

5 Литература

1. Лабораторный практикум по общей физике: Квантовая физика: Учеб. пособие для вузов /Игошин Ф.Ф., Самарский Ю.А., Ципенюк Ю.М.

6 Приложение

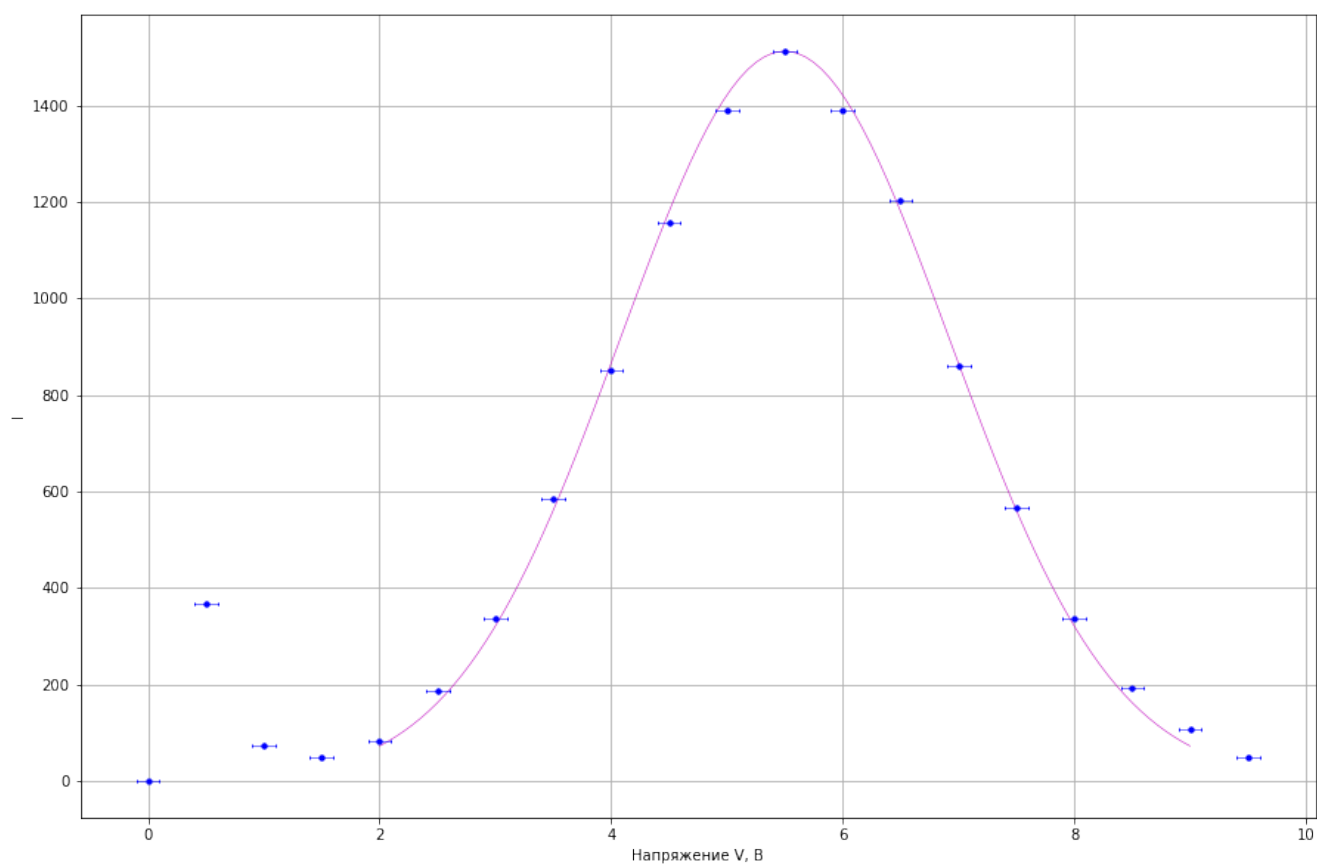


Рисунок 4 – Спектр источника

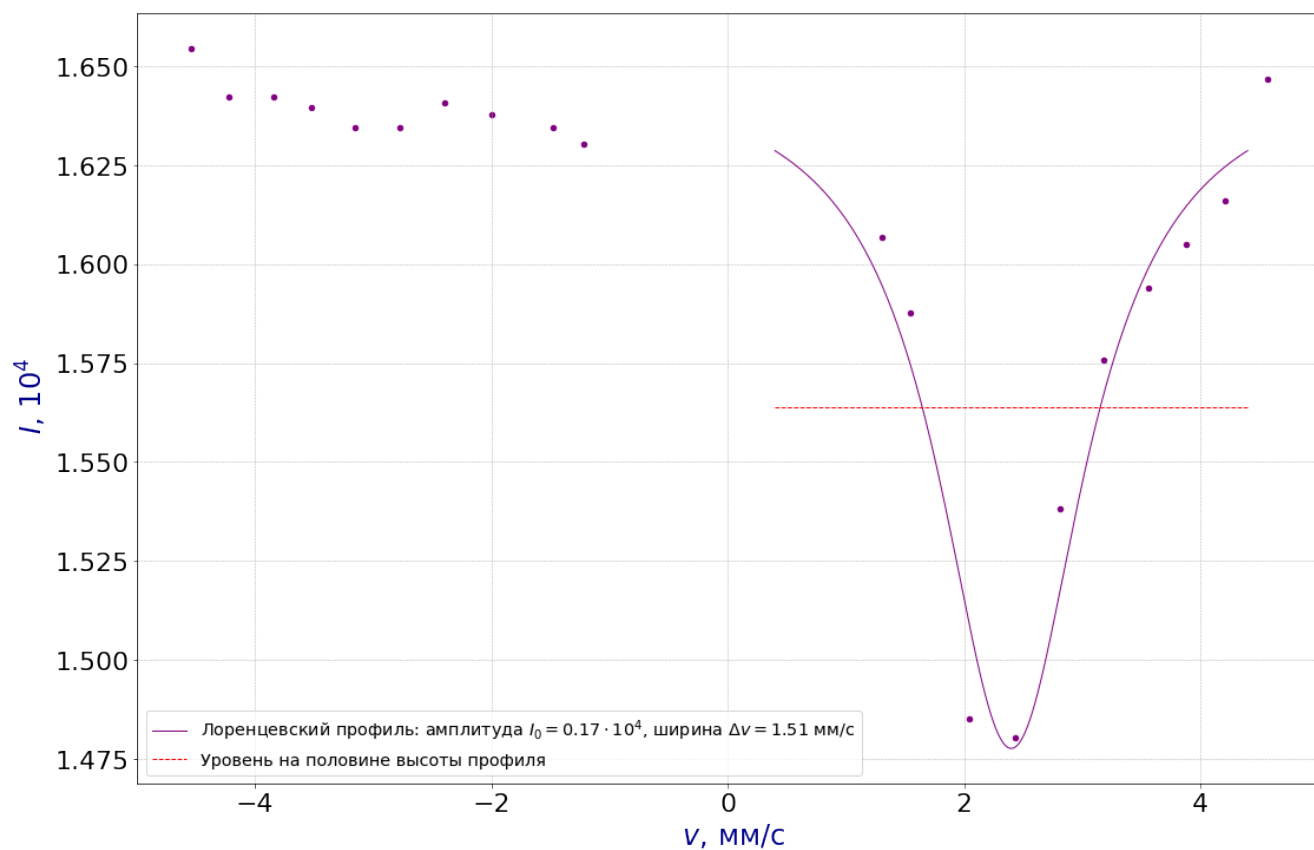


Рисунок 5 – График зависимости интенсивности от скорости движения поглотителя для первого образца

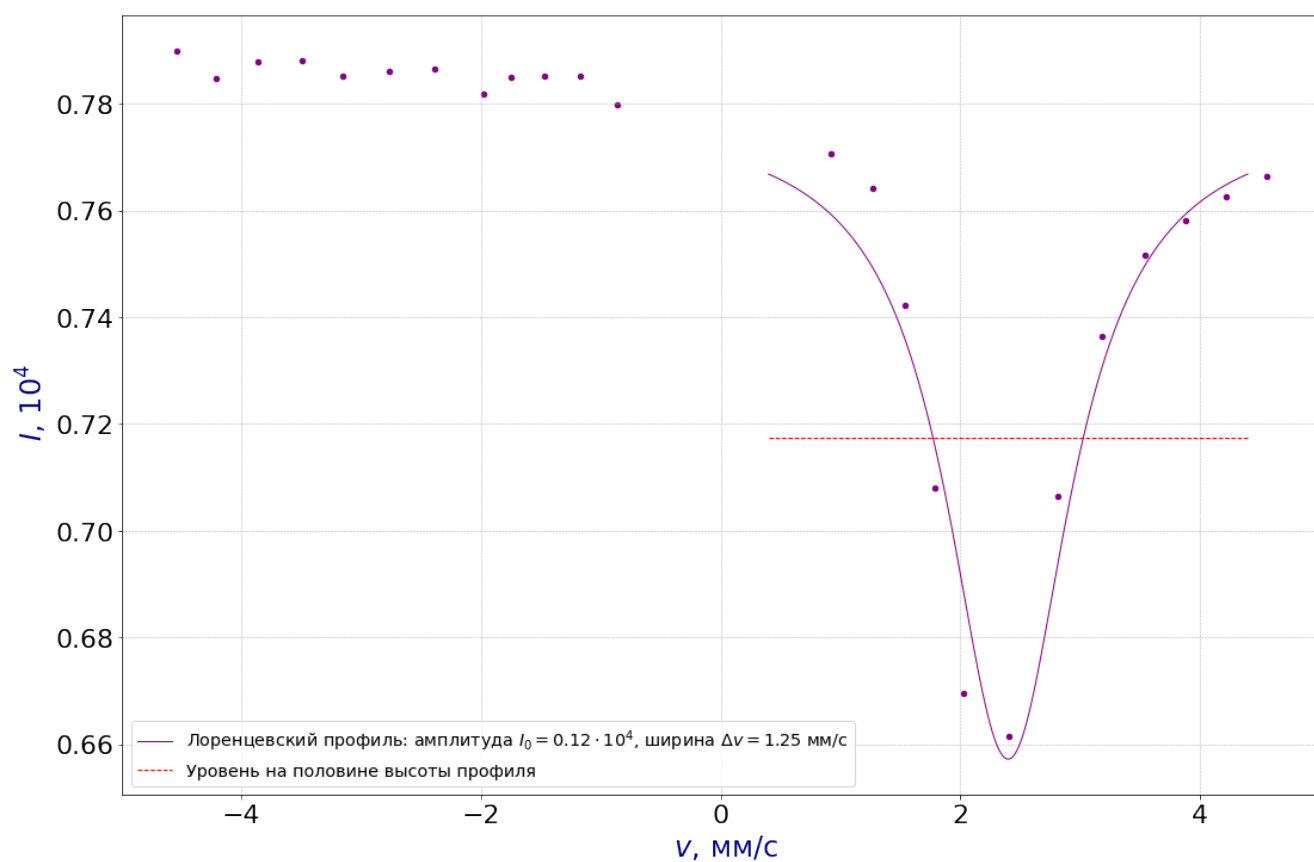


Рисунок 6 – График зависимости интенсивности от скорости движения поглотителя для второго образца

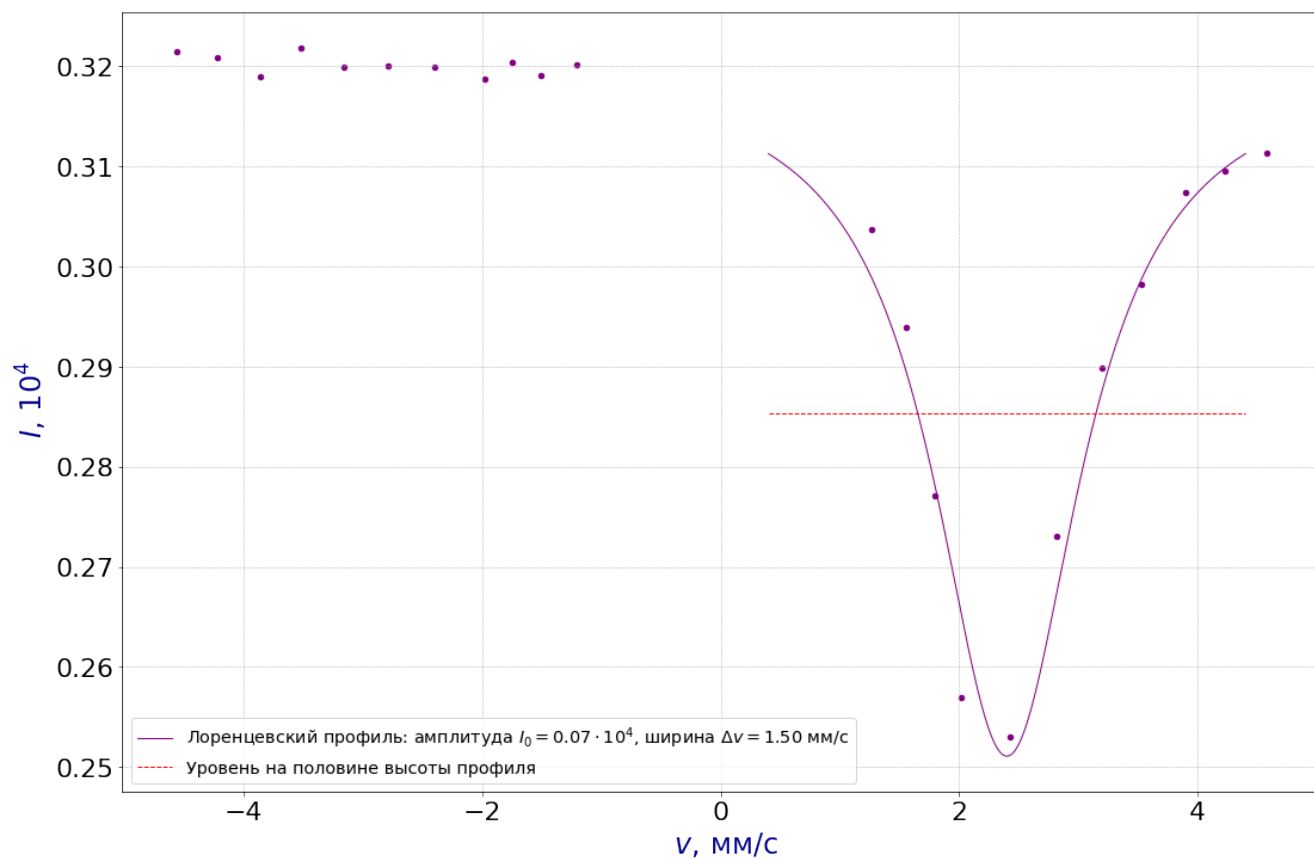


Рисунок 7 – График зависимости интенсивности от скорости движения поглотителя для третьего образца

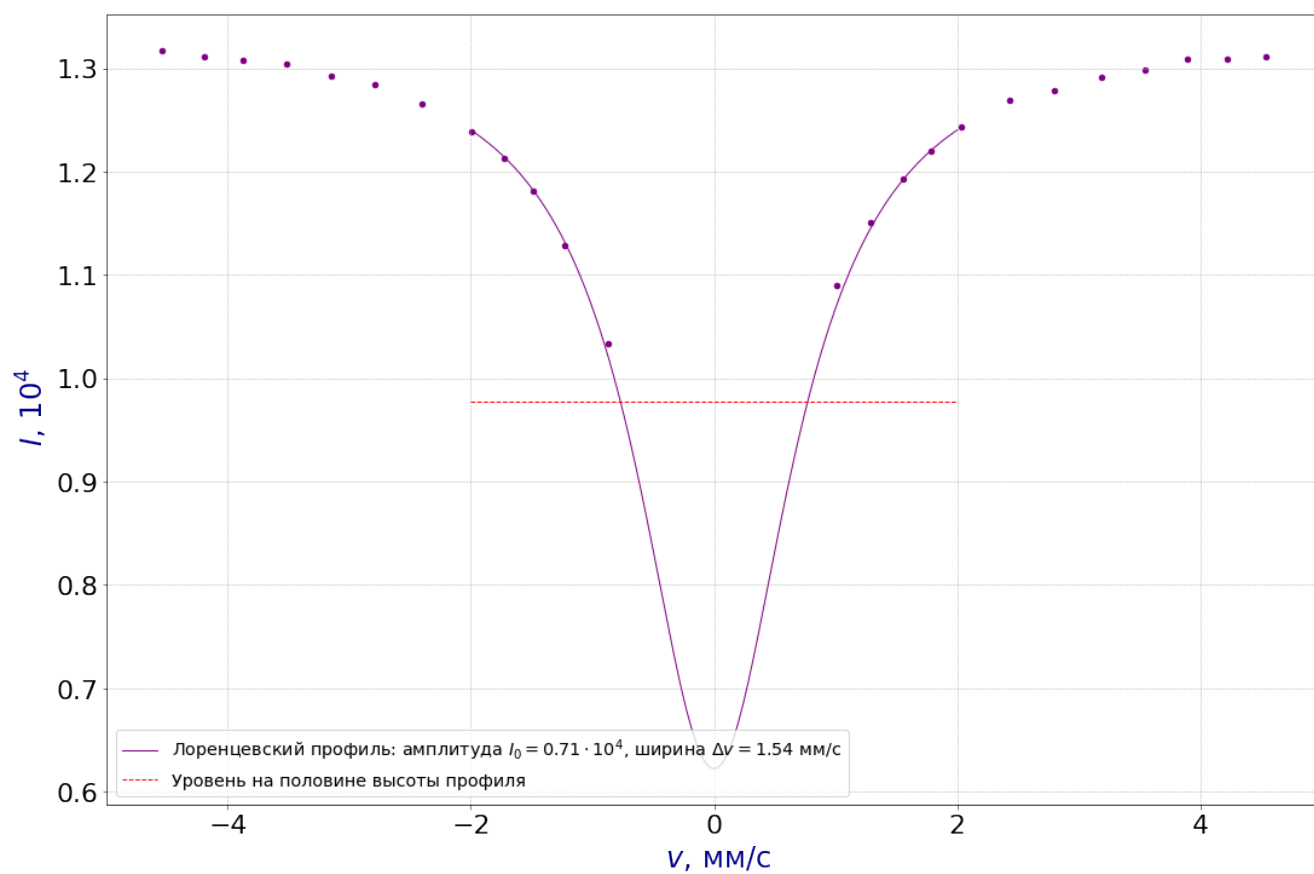


Рисунок 8 – График зависимости интенсивности от скорости движения поглотителя для четвертого образца