

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА С КОНВЕРТЕРОМ
ИЗ ОРИЕНТИРОВАННОГО КРИСТАЛЛА

©2024 г. В. А. Басков^а

^аФизический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

*e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

Поступила в редакцию 11.03.2024 г.

После доработки 02.05.2024 г.

Принята к публикации 06.06.2024 г.

Ориентированный вдоль оси монокристаллический конвертер, находящийся перед электромагнитным спектрометром, меняет отклик спектрометра, регистрирующего электроны с энергиями в десятки ГэВ. При энергии электронов 26 и 28 ГэВ в зависимости от ориентации, толщины, типа кристаллического конвертора и толщины спектрометра относительное энергетическое разрешение спектрометра улучшается на величину от 15% до 80%.

1. ВЕДЕНИЕ

При взаимодействии γ -квантов, электронов и позитронов с энергией $E > 100$ МэВ с кристаллом в широком интервале углов входа частиц относительно кристаллографической оси (плоскости) $\Theta \sim V/m \cdot c^2$ (V – масштаб потенциала оси или плоскости, m – масса электрона, c – скорость света) на длине формирования процессов излучения электроном (позитроном) и рождения e^+e^- -пар γ -квантом в кристалле $l \gg a$ (где a – постоянная решетки) оказывается большое число ядер. Когерентное взаимодействие частиц с этой совокупностью ядер приводит к значительному увеличению вероятности процессов и в конечном счете приводит к развитию аномальных электромагнитных ливней [1–3].

Особенно сильный эффект при входе частиц в кристалл с энергиями в десятки ГэВ возникает при углах $\Theta \ll V/m \cdot c^2$ [2]. В этой области углов частица взаимодействует с полем не

отдельных атомов или группой атомов, а практически со всей совокупностью атомов оси (плоскости) кристалла. Начинает работать механизм постоянного сильного поля (ПСП), приводящий еще к более значительному росту сечений электродинамических процессов [1, 2].

Отличие электромагнитного ливня, развивающегося в поле оси или плоскости ориентированного кристалла (кристалл считается ориентированным, когда $\Theta \approx 0$, где Θ – угол между импульсом γ -кванта, электрона или позитрона и осью (плоскостью) кристалла, относительно которой происходит ориентация) от стандартного электромагнитного ливня заключается в изменении практически всех параметров ливня: числе заряженных и незаряженных частиц, величинах радиационных длин, наличием температурной и ориентационной зависимостей и т. д., что ведет к изменению отклика спектрометра, регистрирующего этот ливень [4–7].

2. СПЕКТРОМЕТР НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

Важным результатом, выходящим из теории и экспериментальных исследований, явилась возможность использования аномальных ливней в ориентированных кристаллах в практической деятельности, а именно, в создании спектрометров направленного действия (СНД) для применения в экспериментальной физике высоких энергий на ускорителях и космических исследованиях [2, 8–10].

Спектрометр направленного действия – это спектрометр полного поглощения, регистрирующий частицы в заданном направлении и представляющий из себя спектрометр с конвертером из ориентированного непрозрачного или прозрачного кристалла или спектрометр на основе непосредственно прозрачного кристалла (рис. 1а). Кристаллографическая ось конвертора или прозрачного кристалла-спектрометра направлена на источник частиц – на мишень или область взаимодействия в случае встречных пучков (рис. 1б).

Рис. 1. Схема спектрометров направленного действия

В зависимости от целей установки и назначения, в которой используется СНД, в качестве конвертера можно использовать непрозрачные кристаллы типа кремния (Si), германия (Ge), вольфрама (W) и прозрачные кристаллы типа вольфрамата ($PbWO_4$), граната ($Gd_3Ga_5O_{12}$) и т. д. [9].

Область работы СНД определяется шириной ориентационной зависимости $\Delta\Theta$ какого-либо параметра аномального ливня, например энерговыделения в детекторе, находящемся за кристаллом и регистрирующем ливень (рис. 2); $\Delta\Theta$ является полной шириной угловой

зависимости энерговыделения в детекторе на половине разности между минимальным ($\Theta \gg 0$) и максимальным ($\Theta \approx 0$) энерговыделениями относительно нулевого угла ориентации кристалла. Экспериментально определено, что порядок значений $\Delta\Theta$ при энергиях электронов в десятки ГэВ и толщин кристаллов кремния и вольфрама $t_{\text{крист}} \sim 0.25X_0$ (X_0 – радиационная длина аморфного кристалла ($X_{0\text{w}} = 0.35$ см, $X_{0\text{si}} = 9.4$ см)) будет составлять $\Delta\Theta_{\text{Si}} \sim 1$ мрад и $\Delta\Theta_{\text{W}} \sim 10$ мрад [4–10].

Рис. 2. Схема определения ширины ориентационной зависимости $\Delta\Theta_{\Delta E}$ энерговыделения электромагнитного ливня в черенковском счетчике

Из анализа сравнения существующих результатов по регистрации стандартным электромагнитным спектрометром аномальных и стандартных ливней можно сделать важное замечание, состоящее в том, что спектрометр, регистрирующий стандартные ливни, можно условно назвать пассивным спектрометром с характеристиками, заданными при проектировании, которые уточняются при тестированиях на пучках частиц. Относительно небольшое количество экспериментальных работ, в которых исследовались спектрометры с ориентированными конверторами, показывают, что система “ориентированный конвертор - спектрометр” является условно активным спектрометром, поскольку ориентированный конвертор оказывает значительное влияние на отклик и характеристики спектрометра. В отличие от отклика пассивного спектрометра, отклик активного спектрометра может меняться, уходя от конструктивно заданных параметров, при изменении параметров конвертора: типа, толщины, угла ориентации, температуры, потенциала оси ориентации [7].

В целом, можно считать, что пассивный спектрометр является частным случаем активного спектрометра при отсутствии или разориентации конвертора [4, 11, 12].

Поскольку ориентированный конвертор меняет отклик пассивного спектрометра на отклик активного спектрометра, то меняется и такая важнейшая характеристика электромагнитного спектрометра, как энергетическое разрешение.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований энергетического разрешения электромагнитного спектрометра с ориентированным непрозрачным кристаллическим конвертором.

3. УСТАНОВКА “КАСКАД”

Работа была выполнена на установке “Каскад” на электронном канале ускорителя института физики высоких энергий (ИФВЭ, Протвино) в рамках программы изучения эффектов квантовой электродинамики в сильных полях ориентированных кристаллов [13].

Схема экспериментальной установки “Каскад” представлена на рис. 3 [14]. В работе использовались непрозрачные конверторы из кристаллов вольфрама (W) диаметром 20 мм толщами 1, 2.7, 5.8 и 8.4 мм и кристалла кремния (Si) толщиной 20 мм. Исследования проводились при комнатной температуре кристаллов $T_1 = 293\text{K}$ и температуре жидкого азота $T_2 = 77\text{K}$. Ориентация кристаллов вольфрама происходила вдоль кристаллографической оси $\langle 111 \rangle$, кристалла кремния вдоль оси $\langle 110 \rangle$. Разориентированным или аморфным считался кристалл, ось которого была повернута относительно импульса пучка электронов в сторону от кристаллографической оси на углы $\Theta_w > 20$ мрад и $\Theta_{\text{Si}} > 4$ мрад. Мозаичность кристаллов вольфрама и кремния составляла $\Delta\Theta_{\text{M w}} = 1$ мрад и $\Delta\Theta_{\text{M si}} < 0.5$ мрад. В эксперименте использовались пучки электронов с энергиями $E = 26, 28$ и 31 ГэВ с импульсным разбросом 0.76 ГэВ/с и расходимостью $|\nu| \leq 0.1$ мрад. Диапазон энергий фотонных пучков составлял $3\text{--}28$ ГэВ.

Рис. 3. Схема экспериментальной установки “Каскад”

Ливни, выходящие из кристалла, регистрировались составным черенковским ливневым спектрометром (СЧЛС), в котором по анализу формы каскадных и интегральных кривых определялись характеристики электромагнитных ливней [15].

СЧЛС состоял из 10 независимых светоизолированных счетчиков (радиаторов) из свинцового стекла ТФ-1 (рис. 4а). Счетчики имели одинаковый размер 100×100 мм² и толщину $1X_0 = 25$ мм. Сигнал с каждого счетчика регистрировался фотоэлектронным умножителем ФЭУ-85.

Рис. 4. Схема ЧСПП и расположения ЧСПП и ЧС на пучке

Для сбора оставшейся части ливня за СЧЛС помещался черенковский спектрометр (ЧС) толщиной $15X_0$ (рис.4б). ЧС имел шестигранный радиатор из свинцового стекла ТФ-1 с диаметром вписанной окружности 180 мм. Для снятия сигнала использовался ФЭУ-49-Б. ЧС также использовался для калибровки СЧЛС.

Конструкция последовательного расположения счетчиков СЧЛС и ЧС дала возможность в эксперименте и последующей обработке экспериментальных результатов суммировать сигналы отдельных счетчиков и формировать различные толщины спектрометра, находящегося за кристаллом, от $1X_0$ до $10X_0$ и толщину суммарного спектрометра СЧЛС+ЧС равную $25X_0$.

Калибровка СЧЛС и ЧС была проведена на пучках электронов с энергиями 26 и 28 ГэВ в два этапа [14,15]. На первом этапе была проведена калибровка ЧС, на втором этапе перед ЧС был помещен СЧЛС и прокалиброван суммарный спектрометр (ЧСПП+ЧС). При калибровке перед ЧСПП и перед суммарным спектрометром кристаллический конвертор отсутствовал.

4. КАСКАДНЫЕ КРИВЫЕ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИВНЕЙ

На рис. 5 приведены каскадные кривые развития электромагнитных ливней от электронов с энергией 26 ГэВ, выходящие из разориентированных (а) и ориентированных вдоль оси $\langle 111 \rangle$ (б) кристаллов вольфрама 2.7, 5.8 и 8.4 мм при комнатной температуре $T_w = 293\text{K}$ и далее продолжающих развиваться в СЧЛС [5]. На рисунке по оси абсцисс отложена толщина спектрометра СЧЛС ($t_{\text{СЧЛС}}$) в радиационных длинах, по оси ординат отложена средняя энергия ливня ($\langle \Delta E \rangle$), оставленная им в каждом счетчике спектрометра. Кривая K – калибровочная кривая, относится к отсутствию перед СЧЛС кристаллического конвертора. В этом случае начало развития ливня приходится на первый счетчик СЧЛС.

Рис. 5. Каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов с энергией $E_e = 26$ ГэВ

5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ

5.1. Среднеквадратичное разрешение

На рис. 6 показаны зависимости среднеквадратичного разрешения σ спектра энерговыделения ливня в счетчиках СЧЛС разной толщины и суммарного спектрометра ($\sigma = \text{FWHM}/2.35$, где FWHM – полная ширина на половине высоты спектра энерговыделения ливня в счетчиках, $2.35 = 2(\ln 2) \cdot \sqrt{2}$).

Рис. 6. Зависимость среднеквадратичного разрешения σ спектрометра СЧЛС+ЧС от его толщины $t_{\text{СЧЛС+ЧС}}$.

При разориентированном и ориентированном состояниях конвертора перед суммарным спектрометром поведение σ от толщины спектрометра имеет качественно одинаковый характер развития ливня в СЧЛС, наблюдавшийся в [4]. Величина σ “тонкого” (2.7 мм) ориентированного конвертора в максимуме развития ливня при $t_{\text{СЧЛС}} \sim 5-8X_0$ изменилась несильно относительно разориентированного состояния. Однако в обоих случаях значения σ уменьшилась примерно на 25% относительно значения, полученного при калибровке спектрометра (конвертор отсутствует). При ориентации “толстых” конверторов (5.8 и 8.4 мм) величина σ уменьшилась еще примерно на 35% и уменьшение в сумме для этих конвертеров составило порядка 60% (рис. 5б). При толщинах СЧЛС $t_{\text{СЧЛС}} \geq 5-8X_0$ и ориентированном конверторе хорошо видна сильная зависимость σ от толщины конвертора.

На рис. 6а видно стандартное поведение зависимости σ от толщины разориентированного

конвертора [16]. Иное поведение σ наблюдается при наличии ориентированного конвертора перед суммарным спектрометром (рис. 6б). Особенно значительные различия наблюдаются для “толстых” кристаллов 5.8 мм и 8.4 мм.

Действительно, при ориентации кристалла качественно меняется суть конвертора, так как он из пассивного элемента конструкции спектрометра переходит в активный. В пассивном конверторе флуктуации в веществе конвертора значительные и увеличиваются с толщиной конвертора (рис. 5а) [17]. Взаимодействие ливневых частиц с атомными ядрами, т. е. излучение электронов и рождение e^+e^- -пар γ -квантами происходит по стандартному механизму Бете–Гайтлера [1, 2].

Развитие аномального ливня в ориентированном конверторе с последующим выходом из конвертора и дальнейшим развитием в аморфном веществе спектрометра имеет более сложный характер. В активном конверторе ливень развивается в электромагнитном поле большого числа ядер, ливневые частицы когерентно взаимодействуют с атомными ядрами. В поле кристаллографической оси возникают также процессы каналирования ливневых частиц с последующим излучением электронами и позитронами и рождением e^+e^- -пар фотонами. По мере развития ливня из-за уменьшения энергии ливневых частиц возрастает процесс рассеяния заряженных частиц на атомах кристаллографической оси и выход части частиц за пределы области когерентного взаимодействия ливневых частиц с атомами оси (процесс дезориентации). Вышедшие из области электромагнитного поля оси частицы снова начинают взаимодействовать с отдельными атомами. Однако из-за того же процесса рассеяния часть ливневых частиц обратно входит в область сильного осевого электромагнитного поля, продолжая процесс развития аномального ливня.

При выходе аномального ливня из кристалла его дальнейшее развитие продолжается, а аморфном веществе спектрометра с взаимодействием вторичных ливневых частиц уже с аморфным веществом. Однако эксперименты и рис. 5б и 6б показывают, что по выходу из кристалла аномальность ливня сохраняется. Особенно сильно отличие аномальных ливней от стандартных наблюдается при развитии ливня в “толстых” кристаллах 5.8 мм и 8.4 мм.

При таких толщинах кристаллов и $t_{\text{СЧЛС}} \approx 5-8X_0$ значения σ примерно на 45% меньше, чем при толщине кристалла $t_W = 2.7$ мм. Это означает, что число ливневых частиц значительно и величины флуктуаций меньше, чем в случае тонких кристаллов. Однако в области толщин СЧЛС, $t_{\text{СЧЛС}} > 8X_0$, зависимости σ для всех трех исследованных толщин кристаллов существенно различаются. Это можно объяснить тем, что по мере увеличения толщины кристалла поглощение вторичных ливневых частиц значительное, что приводит к увеличению σ .

5.2. Относительное энергетическое разрешение

Относительное энергетическое разрешение СЧЛС и суммарного спектрометра (СЧЛС+ЧС) $\delta = \sigma/\Delta E$ (ΔE – доля энергии ливня, поглощенная спектрометром соответствующей толщины) в зависимости от толщины спектрометра и толщины кристалла, находящегося перед ним, при энергии электронов 26 ГэВ показано на рис. 7 и 8 соответственно [18].

Рис. 7. Зависимость относительного энергетического разрешения суммарного спектрометра от его толщины t_{CC}

Рис. 8. Зависимость относительного энергетического разрешения суммарного спектрометра от толщины вольфрамового кристаллического конвертора t_w

При различных длинах спектрометра наблюдается существенное (в 2–5 раз) улучшение энергетического разрешения суммарного спектрометра по сравнению с разрешением спектрометра без кристалла и с разориентированным кристаллом.

6. ОПТИМАЛЬНАЯ ТОЛЩИНА КРИСТАЛЛА И СПЕКТРОМЕТРА

На рис. 8 видно, что при данной энергии пучка электронов при разориентированном и ориентированном состояниях конвертора существует некоторая оптимальная толщина кристалла ($t_{w\text{opt}}$), соответствующая оптимальной толщине спектрометра ($t_{CC\text{opt}}$), при которой относительное энергетическое разрешение спектрометра наилучшее $\delta = \delta_{\text{min}}$. На рис. 9 представлено соотношение оптимальных толщин кристаллического вольфрамового конвертора перед спектрометром ($t_{w\text{opt}}$) и толщин спектрометра ($t_{CC\text{opt}}$), при которых относительное энергетическое разрешение суммарного спектрометра наилучшее.

Рис. 9. Соотношение оптимальных толщин кристаллического вольфрамового конвертора перед суммарным спектрометром ($t_{w\text{opt}}$) и толщин суммарного спектрометра ($t_{CC\text{opt}}$)

Этот эффект связан с двумя процессами. Первый – увеличение числа вторичных ливневых частиц при развитии ливня по мере увеличения толщины спектрометра и снижение относительной величины флуктуаций, второй – усиление процесса поглощения ливневых частиц и увеличение величины флуктуаций. При определенных толщинах конвертора и спектрометра наступает некоторое равновесие процессов, при котором относительное энергетическое разрешение спектрометра достигает оптимальной или наилучшей величины $\delta = \delta_{\text{min}}$.

7. ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Поскольку параметры электромагнитного ливня, развивающегося в ориентированном монокристаллическом конверторе, и, соответственно, параметры отклика спектрометра зависят от степени ориентации кристаллографической оси или плоскости конвертора относительно оси пучка электронов или γ -квантов [2, 3, 5, 10], то и δ также должна иметь ориентационную зависимость $\Delta\Theta_\delta$. Наличие ориентационной зависимости и ее ширины $\Delta\Theta_\delta$ является важным вопросом, поскольку остается интерес применения ориентированных кристаллов в экспериментальной технике [19, 20].

На рис. 10 показаны ориентационные зависимости δ при регистрации электромагнитных ливней первым счетчиком СЧЛС толщиной $1X_0$ для конверторов из кристаллов вольфрама ($\langle 111 \rangle$) (а) и кремния ($\langle 110 \rangle$) (б), полученные при энергии электронов 26 и 28 ГэВ.

Для обоих типов кристалла видно существенное уменьшение δ при уменьшении угла ориентации. С увеличением толщины кристалла δ также улучшается, но при этом увеличивается ширина ориентационной зависимости $\Delta\Theta_\delta$.

На рис. 10 видно, что при одинаковой энергии электронов δ в случае кристалла вольфрама несколько хуже, чем в случае кристалла кремния, даже с учетом существенно низкой температуры кристалла вольфрама, при которой δ должна быть еще меньше [21]. Этот эффект, возможно, связан с худшей степенью совершенства кристалла или мозаичностью вольфрама по сравнению с кристаллом кремния.

Рис. 10. Ориентационные зависимости относительного энергетического разрешения δ первого счетчика СЧЛС ($t_{\text{СЧЛС}} = 1X_0$) от толщина кристаллического конвертора

Зависимость $\Delta\Theta_\delta$ от толщины и типа кристалла при регистрации аномальных ливней первым счетчиком СЧЛС представлена на рис. 11. Видно, что зависимость линейная и ее можно описать простой формулой: $\Delta\Theta_\delta = \alpha \cdot t_w$, где t_w – толщина кристалла в радиационных длинах (t_w [радиационная длина] = t_w [мм]/ X_0 [мм]), α – коэффициент пропорциональности. В данном случае $\alpha = 12.5$ мрад/рад.длин. В общем случае ширина ориентационной зависимости зависит от энергии частиц ($\Delta\Theta \sim E^{-1/2}$ [22, 23]) и поэтому величина α также должна зависеть от энергии.

Рис. 11. Зависимость ширины ориентационной зависимости относительного энергетического разрешения $\Delta\Theta_\delta$ первого счетчика СЧЛС от толщины и типа кристалла $t_{\text{крист}}$

Более детально соотношение между δ и шириной ориентационной зависимости $\Delta\Theta_\delta$ кристаллов вольфрама и кремния показано на рис. 12. Действительно, δ улучшается с

увеличением толщины кристалла и увеличением $\Delta\Theta_\delta$. Можно предположить, что по мере увеличения толщины кристалла увеличивается число вторичных ливневых частиц, приводящее к уменьшению числа флуктуаций. С другой стороны, увеличивается рассеяние ливневых частиц на атомных ядрах кристалла, приводящее к увеличению $\Delta\Theta_\delta$.

Рис. 12. Соотношение между относительным энергетическим разрешением δ первого счетчика СЧЛС и шириной ориентационной зависимости $\Delta\Theta_\delta$ кристаллов вольфрама

Надо отметить, что на рис. 5–8, 10 линии, описывающие экспериментальные результаты, проведены для наглядности. Погрешности значений энергетического разрешения определялись процедурой подгонки амплитудных спектров полиномом стандартной программы OriginPro 9.0 и составили 15–20% от значений величин, представленных на рисунках.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования энергетического разрешения электромагнитного спектрометра с конвертором из ориентированного кристаллического конвертора показывают, что:

- ориентированный кристаллический конвертор перед спектрометром влияет на энергетическое разрешение спектрометра в сторону его улучшения;
- для каждой толщины спектрометра существует толщина кристаллического конвертора, при котором его энергетическое разрешение наилучшее;
- ширина ориентационной зависимости относительного энергетического разрешения пропорциональна толщине кристаллического конвертора, коэффициент пропорциональности должен зависеть от энергии частиц;
- применение ориентированных конверторов предпочтительно при высоких энергиях, поскольку переводит обычный спектрометр в спектрометр направленного действия, что дает возможность уменьшить толщину спектрометра и улучшить его энергетическое разрешение.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность **Е.И. Тамму** и Е.И. Малиновскому за поддержку работы; В.И. Сергиенко за практическое руководство; В.В. Ким и В.А. Хабло, а также Б.И. Лучкову (НИЯУ МИФИ) и В.Ю. Тугаенко (РКК “Энергия”) и за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Uggerhoj U.I.* // *Reviews of Modern Physics.* 2005. V. 77. P. 1131. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.1131>
2. *Байер В.Н., Катков В.М., Страховенко В.М.* Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах. Новосибирск: Наука, 1989.
3. *Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф.* // *ЖТЭФ.* 1983. Т. 85. С.94.
4. *Басков В.А.* // *КСФ.* 2012. № 10. С.28. <https://doi.org/10.3103/S1068335612100041>
5. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А.* // *КСФ.* 2013. № 5. С. 3. <https://doi.org/10.3103/S1068335613050011>
6. *Басков В.А.* // *КСФ.* 2015. № 4. С. 3. <https://doi.org/10.3103/S1068335615040016>
7. *Басков В.А.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2014. Т. 99. С. 785. <https://doi.org/10.7868/S0370274X14120017>
8. *Soldani M., Bandiera L., Moulson M. et al.* // *Eur. Phys. J. C.* 2023. V. 83. P. 101. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11247-x>
9. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А.* // *Труды сессии-конференции ЯФ ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий”, ИТЭФ, Москва, 2011.* С.16. http://matras.iterp.ru/npd2kl/Malyi_za/24_november/ba/Pt
10. *Зверев В.Г., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю.* Космофизика. Москва: Энергоиздат, 1987. С. 71.
11. *Басков В.А.* // *КСФ.* 2016. № 5. С. 3. <https://doi.org/10.3103/S1068335616050018>
12. *Басков В.А.* // *КСФ.* 2014. №3. С.32. <https://doi.org/10.3103/S1068335614030051>
13. *Байер В.Н., Басков В.А., Ганенко В.Б. и др.* Препринт ФИАН №204. Москва, 1988.
14. *Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V., Sergienko V.I.* // *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A.* 1990. V. 297. P. 329. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)91315-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)91315-3)
15. *Басков В.А., Белоусов А.С., Ким В.В., Малиновский Е.И., Усик А.П., Хабло В.А.* // *ПТЭ.* 2011. Т. 5. С. 66.
16. *Словинский Б.* // *ЭЧАЯ.* 1994. Т. 25. № 2. С. 417.
17. *Горячев В. Н., Денисов С. П.* // *Ядерная физика и инжиниринг.* 2021. Т. 12. № 4. С. 229. <https://doi.org/10.56304/S2079562920060275>
18. *Басков В.А., Говорков Б.Б., Ким В.В., Лучков Б.И., Сергиенко В.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А.* // *КСФ.* 1992. № 9/10. С. 41.

19. *Tikhomirov V.V., Haurylavets V. V., Lobko A. S., Mechinsky V. A.* // Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies (ISMART 2016). 2017. V. 200. P. 259.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-68465-9_16
20. *Elsener K., Møller S.P., Petersen J.B.B., Uggerhøj E.* // Cosmic Gamma Rays, Neutrinos, and Related Astrophysics. NATO ASI Series. V. 270. P 457.
https://doi.org/10.1007/978-94-009-0921-2_31
21. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А.* // КСФ. 2012. № 8. С. 16.
<https://doi.org/10.3103/S1068335612080039>
22. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А.* // КСФ. 2013. № 4. С. 35.
<https://doi.org/10.3103/S1068335613040052>
23. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А.* // КСФ. 2011. № 6. С. 8.
<https://doi.org/10.3103/S1068335611060029>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема спектрометров направленного действия: **а** – регистрация e^-, e^+ , γ -квантов на основе ориентированных вдоль оси непрозрачных и прозрачных кристаллов, **б** – схема применения спектрометров направленного действия в экспериментальной установке.
- Рис. 2.** Схема определения ширины ориентационной зависимости $\Delta\Theta_{\Delta E}$ энергосыделения электромагнитного ливня в черенковском счетчике толщиной $1X_0$, выходящего из кристалла вольфрама толщиной $t_w = 1$ мм: $E = 28$ ГэВ, $T_w = 77$ К, ось $\langle 111 \rangle$.
- Рис. 3.** Схема экспериментальной установки “Каскад”: А1–А3 и С1–С6 – сцинтилляционные счетчики, ПК1–ПК3 – пучковые пропорциональные камеры, Р – радиатор, ММ – магнит системы мечения фотонов, Г – гониометр, М – кристаллический конвертор, Т – сцинтилляционный счетчик для регистрации заряженных частиц ливня, СЧЛС – составной черенковский ливневый спектрометр, ЧС – черенковский спектрометр; МСППС – многоканальный свинцово-сцинтилляционный спектрометр полного поглощения.
- Рис. 4.** **а** – Схема ЧСПП и расположения ЧСПП и ЧС на пучке: 1 – радиатор; 2 – алюминированный майлар, 3 – черная светонепроницаемая бумага, 4 – черная изоляционная лента, 5 – ФЭУ-85, 6 – делитель, 7 – крепления радиатора, ФЭУ и делителей, 8 – корпус. **б** – Схема ЧС: 1 – радиатор, 2 – ФЭУ-49, 3 – делитель, 4 – корпус.
- Рис. 5.** Каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов с энергией $E_e = 26$ ГэВ в зависимости от толщины разориентированных (**а**) и ориентированных вдоль оси $\langle 111 \rangle$ (**б**) кристаллов вольфрама перед СЧЛС, K – калибровка (кристалл перед СЧЛС отсутствует).
- Рис. 6.** Зависимость среднеквадратичного разрешения σ спектрометра СЧЛС+ЧС от его толщины $t_{\text{СЧЛС+ЧС}}$ и толщины разориентированного (**а**) и ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$ вольфрамового кристаллического конвертора (**б**); $E = 26$ ГэВ, $T_w = 293$ К, K – калибровка ($t_w = 0$), толщины кристаллов показаны слева от кривых.
- Рис. 7.** Зависимость относительного энергетического разрешения суммарного спектрометра от его толщины $t_{\text{СС}}$ при разориентированном (**а**) и ориентированном вдоль оси $\langle 111 \rangle$ вольфрамовом кристаллическом конверторе (**б**), $E = 26$ ГэВ, $T_w = 293$ К, K – калибровка ($t_w = 0$).

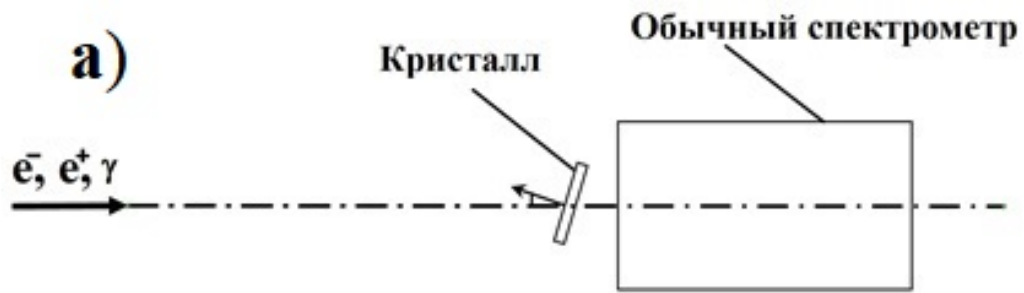
Рис. 8. Зависимость относительного энергетического разрешения суммарного спектрометра от толщины вольфрамового кристаллического конвертора t_w ; толщина спектрометра СЧЛС в радиационных длинах показана справа от кривых; $E = 26$ ГэВ, \circ – калибровка, \bullet – $t_w = 293\text{К}$; \blacktriangle , Δ – $t_w = 77\text{К}$: **а** – конвертор разориентирован, **б** – конвертор ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$, **в** – суммарный спектрометр ($t_{\text{СЧЛС+ЧС}} = 25X_0$; \blacktriangle и Δ – конвертор разориентирован и ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$ соответственно).

Рис. 9. Соотношение оптимальных толщин кристаллического вольфрамового конвертора перед суммарным спектрометром ($t_{w \text{ opt}}$) и толщин суммарного спектрометра ($t_{\text{СС opt}}$), при которых относительное энергетическое разрешение суммарного спектрометра наилучшее.

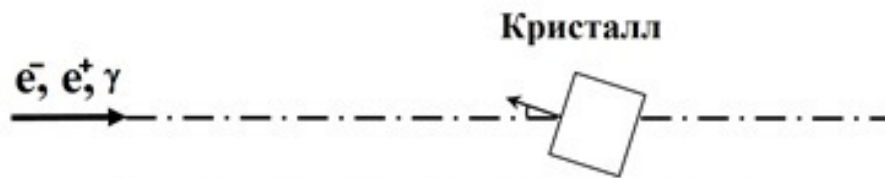
Рис. 10. Ориентационные зависимости относительного энергетического разрешения δ первого счетчика СЧЛС ($t_{\text{СЧЛС}} = 1X_0$) от толщина кристаллического конвертора: **а** – вольфрамовый конвертор ($\langle 111 \rangle$); **б** – кремневый конвертор ($\langle 110 \rangle$); \bullet , \blacktriangle , \circ – $E = 26$ ГэВ; Δ , \blacksquare – $E = 28$ ГэВ; Δ – $T = 77\text{К}$; \bullet , \blacktriangle , \circ – $T = 293\text{К}$; толщины конверторов показаны над зависимостями.

Рис. 11. Зависимость ширины ориентационной зависимости относительного энергетического разрешения $\Delta\Theta_\delta$ первого счетчика СЧЛС от толщины $t_{\text{крист}}$ кристаллов вольфрама (\bullet , \circ , $\langle 111 \rangle$) и кремния (\blacktriangle , $\langle 110 \rangle$): \bullet – $E = 26$ ГэВ, $T_w = 293\text{К}$; \circ , \blacktriangle – $E = 28$ ГэВ, $T_w = 77\text{К}$, $T_{\text{Si}} = 293\text{К}$.

Рис. 12. Соотношение между относительным энергетическим разрешением δ первого счетчика СЧЛС и шириной ориентационной зависимости $\Delta\Theta_\delta$ кристаллов вольфрама (\bullet , \circ) и кремния (\blacktriangle): \bullet – $E = 26$ ГэВ, $T_w = 293\text{К}$; \circ , \blacktriangle – $E = 28$ ГэВ, $T_w = 77\text{К}$, $T_{\text{Si}} = 293\text{К}$; \bullet , \circ – $\langle 111 \rangle$, \blacktriangle – $\langle 110 \rangle$.



Спектрометр направленного действия
на основе непрозрачного кристалла



Спектрометр направленного действия
на основе прозрачного кристалла

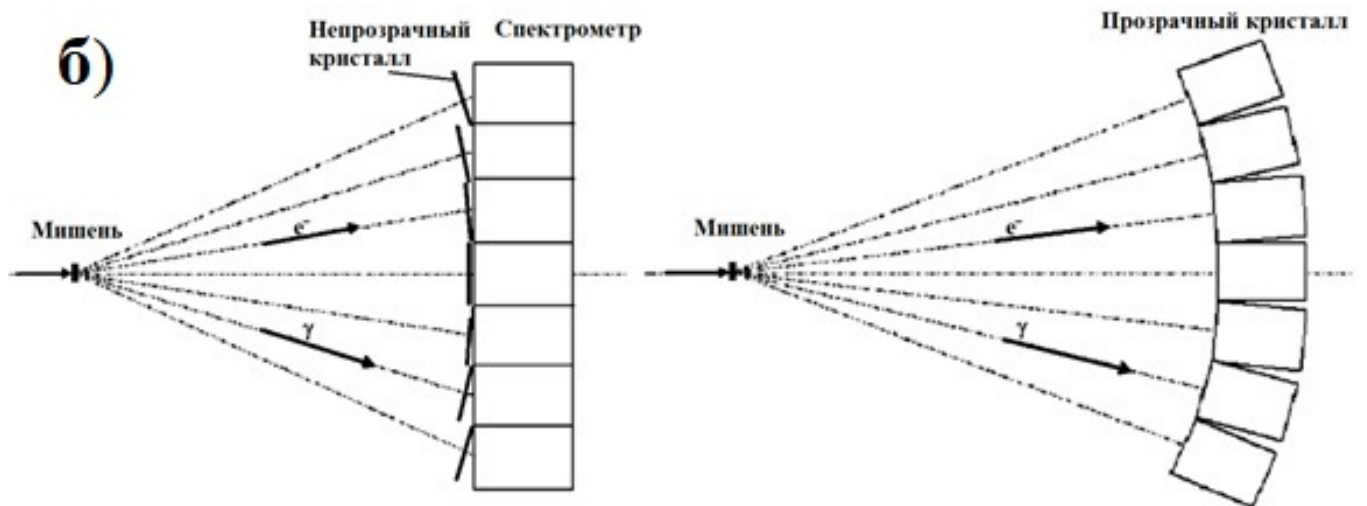


Рис. 1

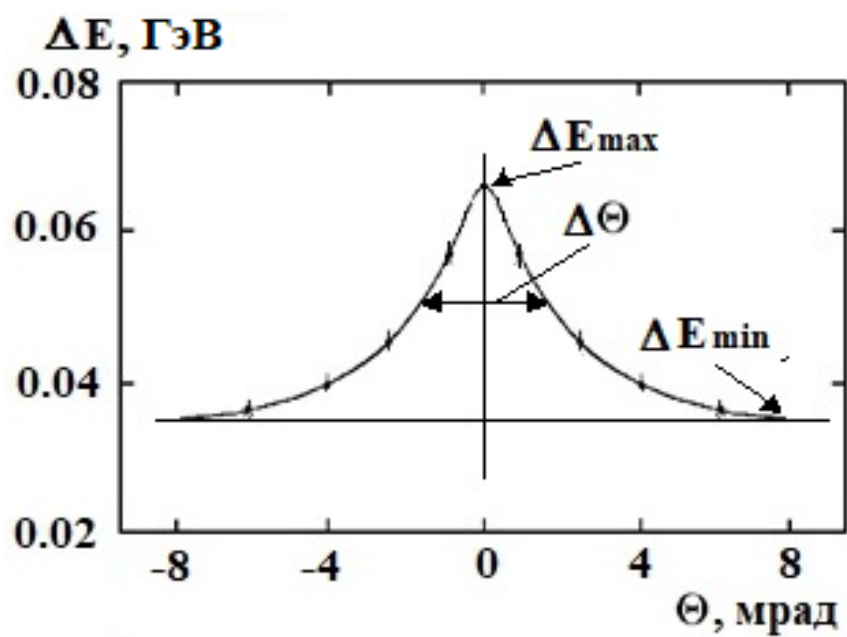


Рис. 2

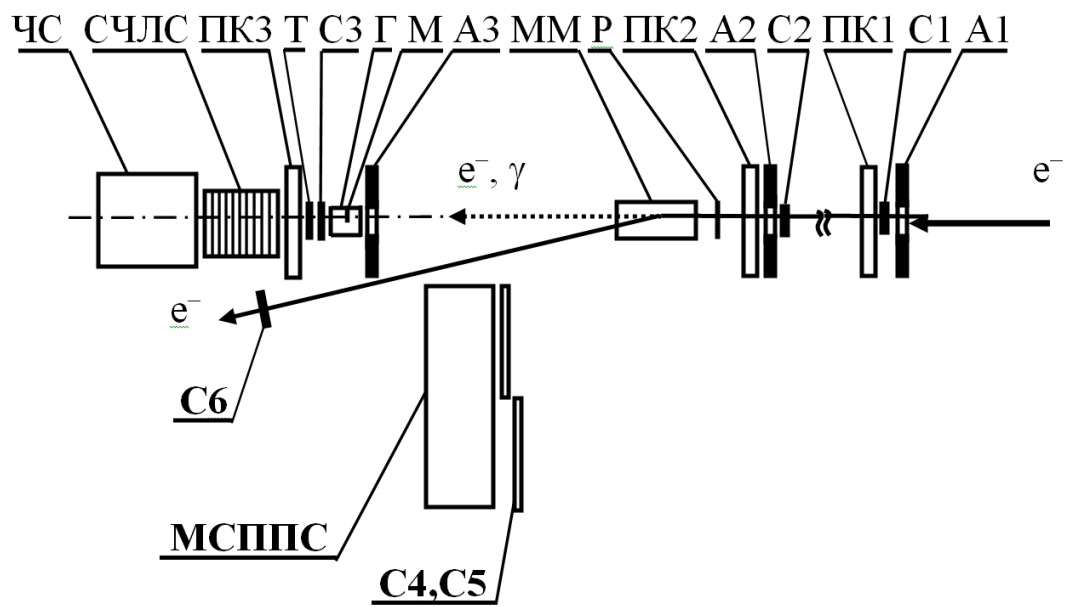


Рис. 3

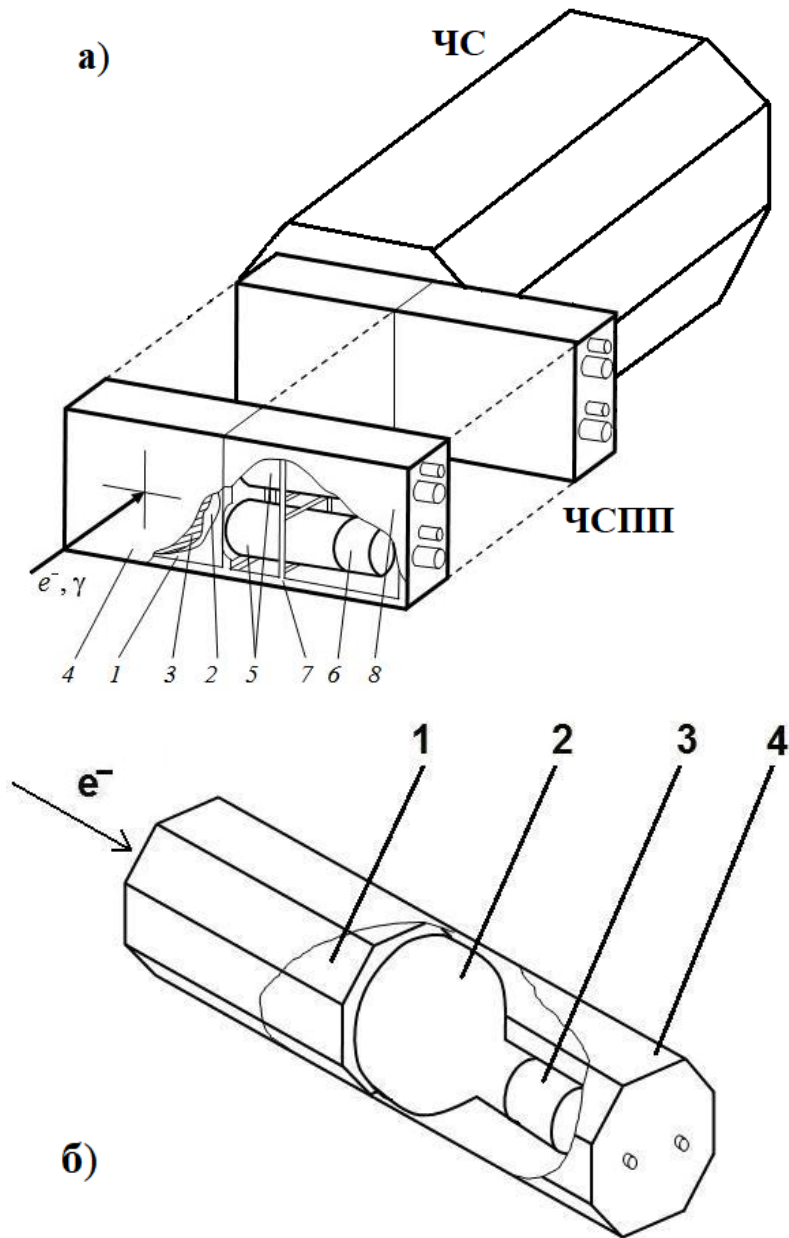


Рис. 4

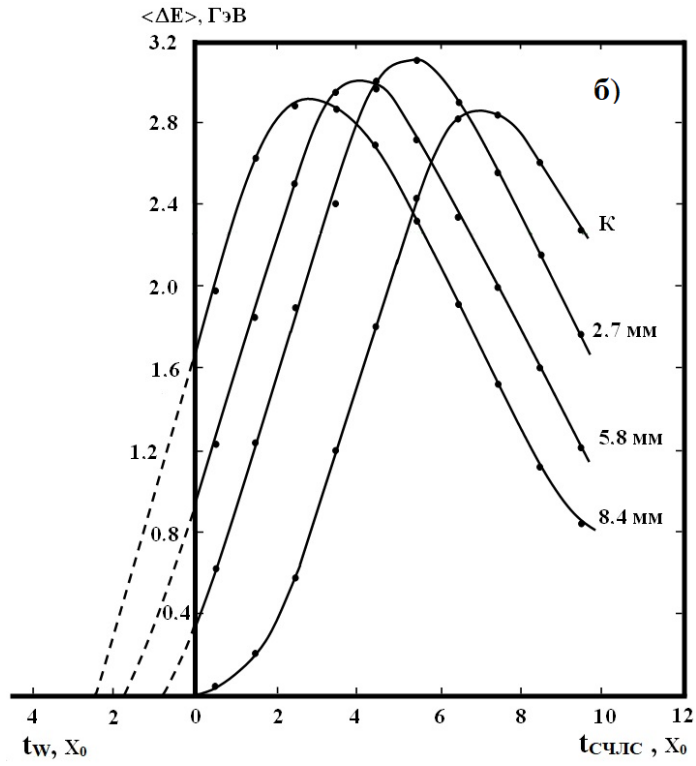
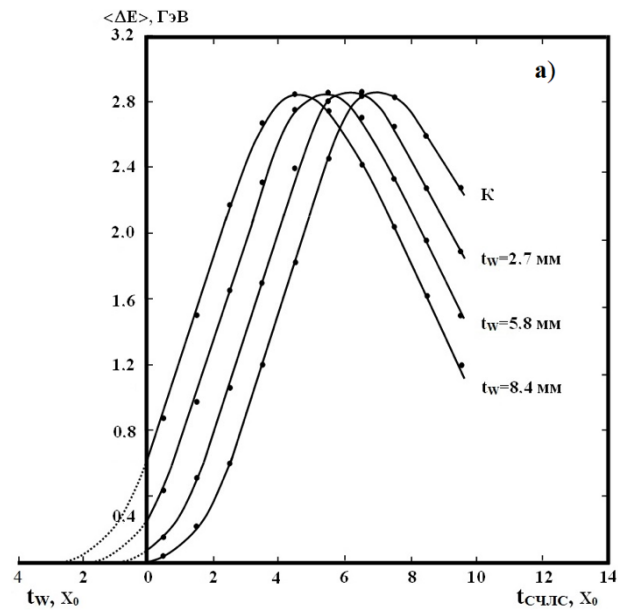


Рис. 5

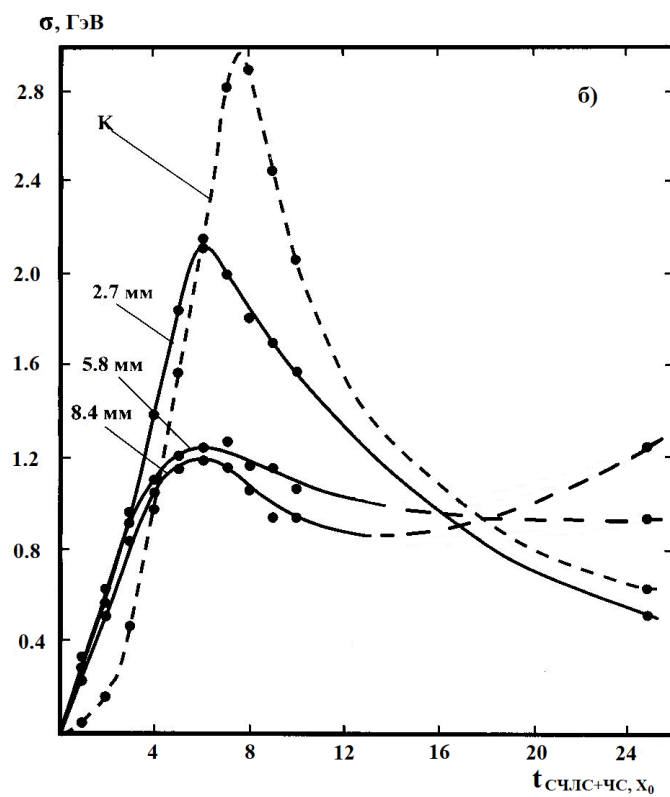
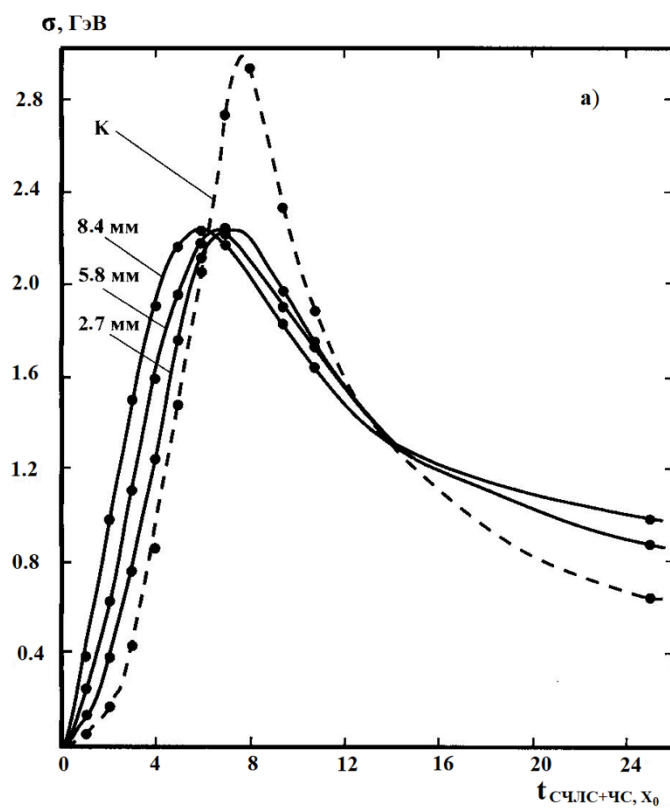


Рис. 6

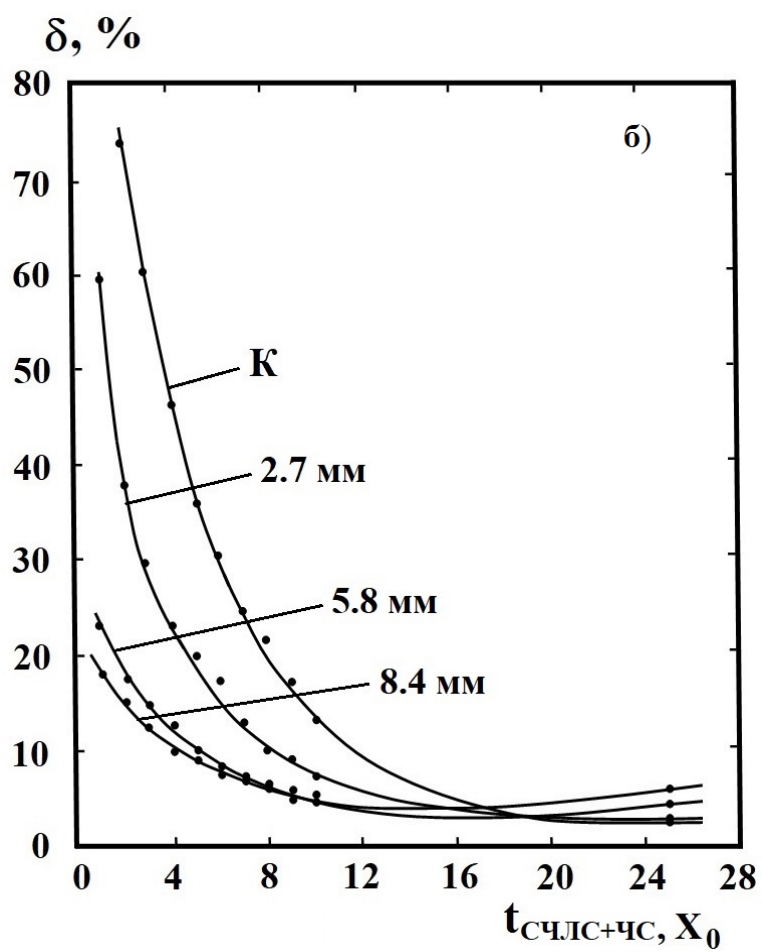
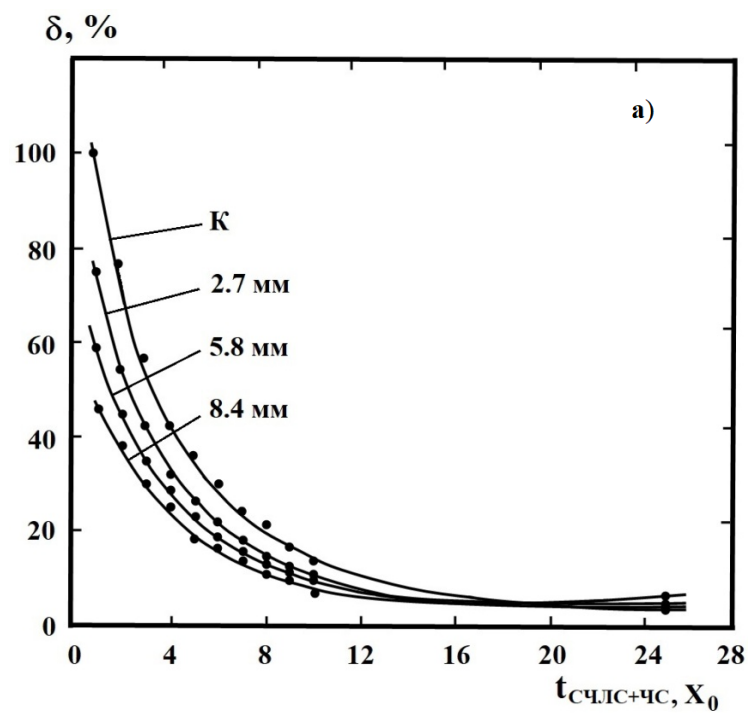


Рис. 7

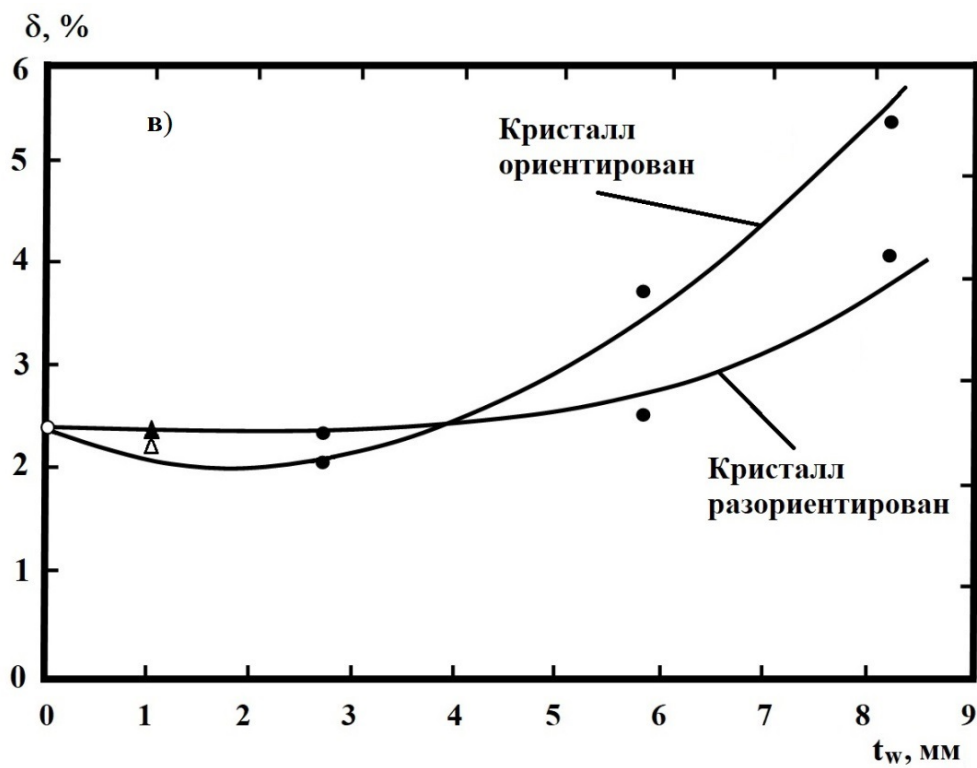
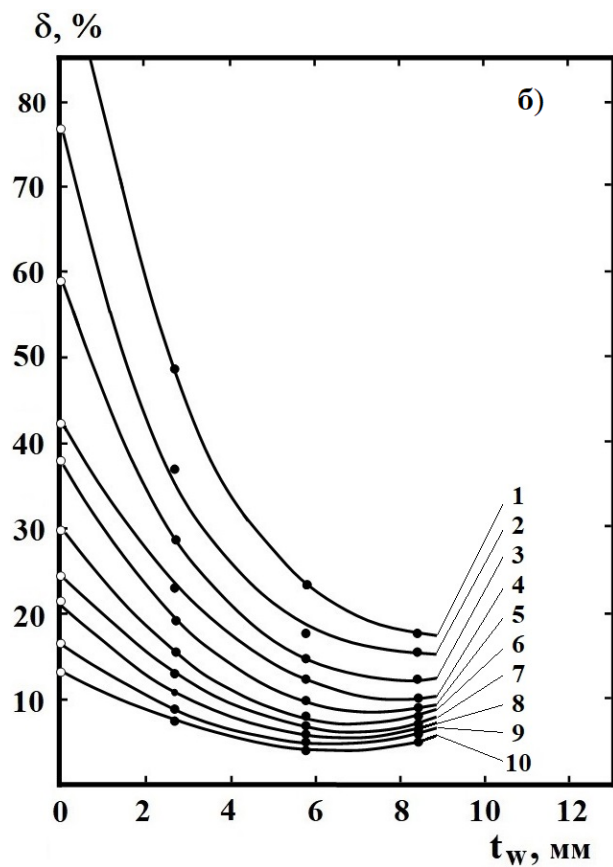
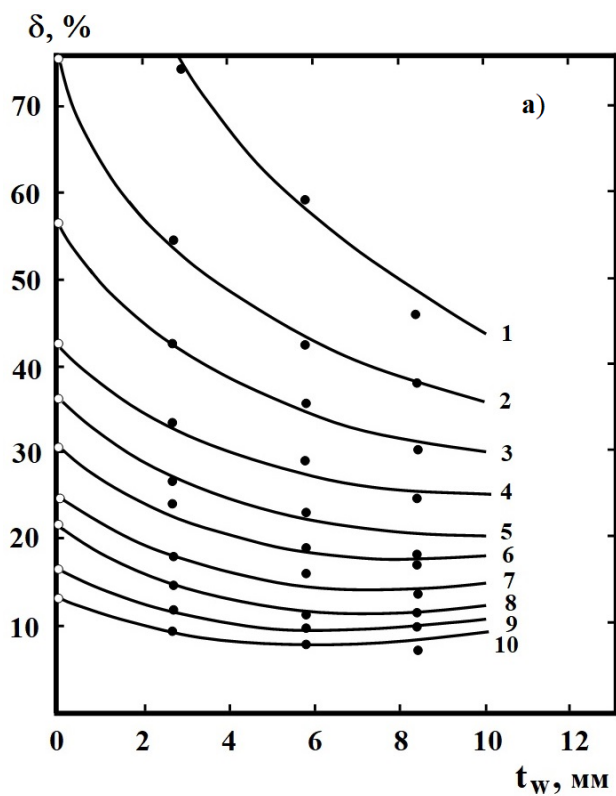


Рис. 8

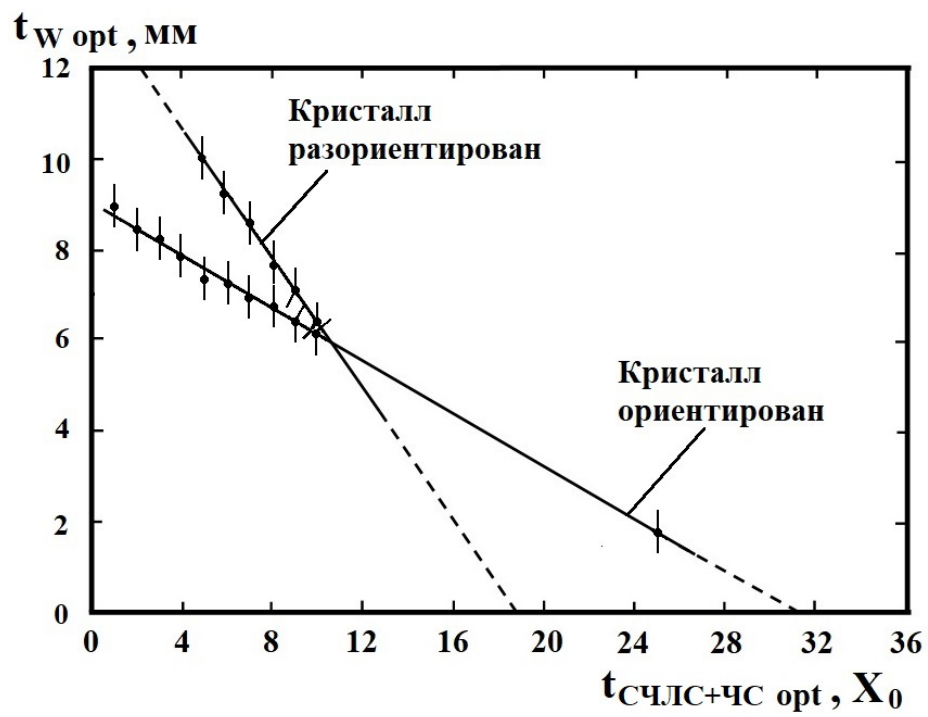


Рис. 9

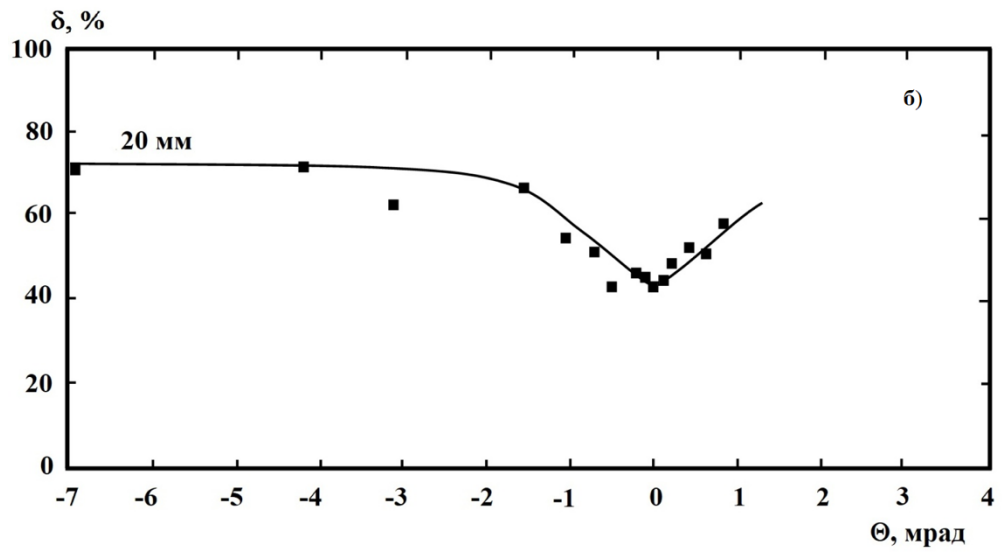
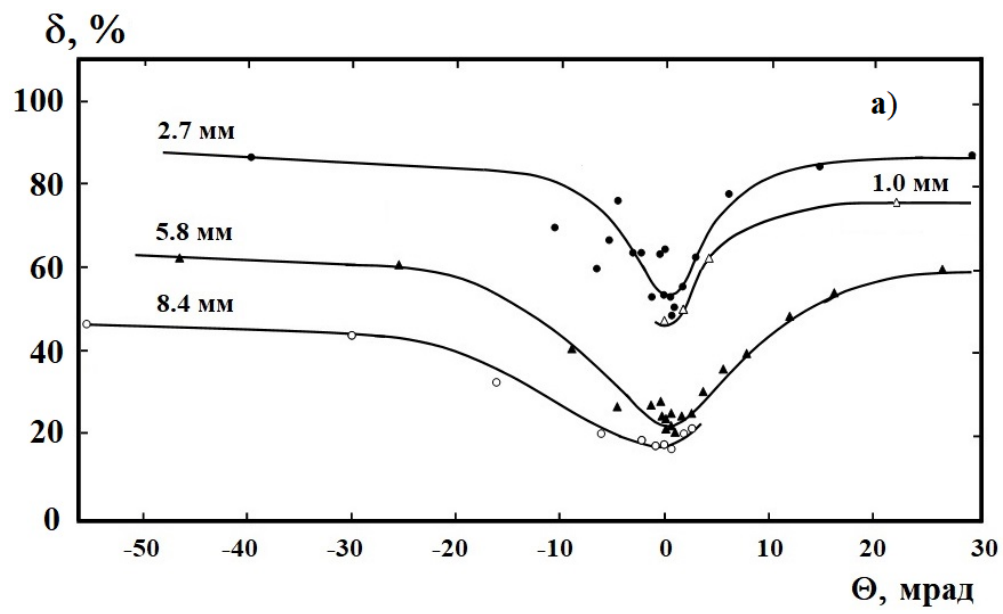


Рис. 10

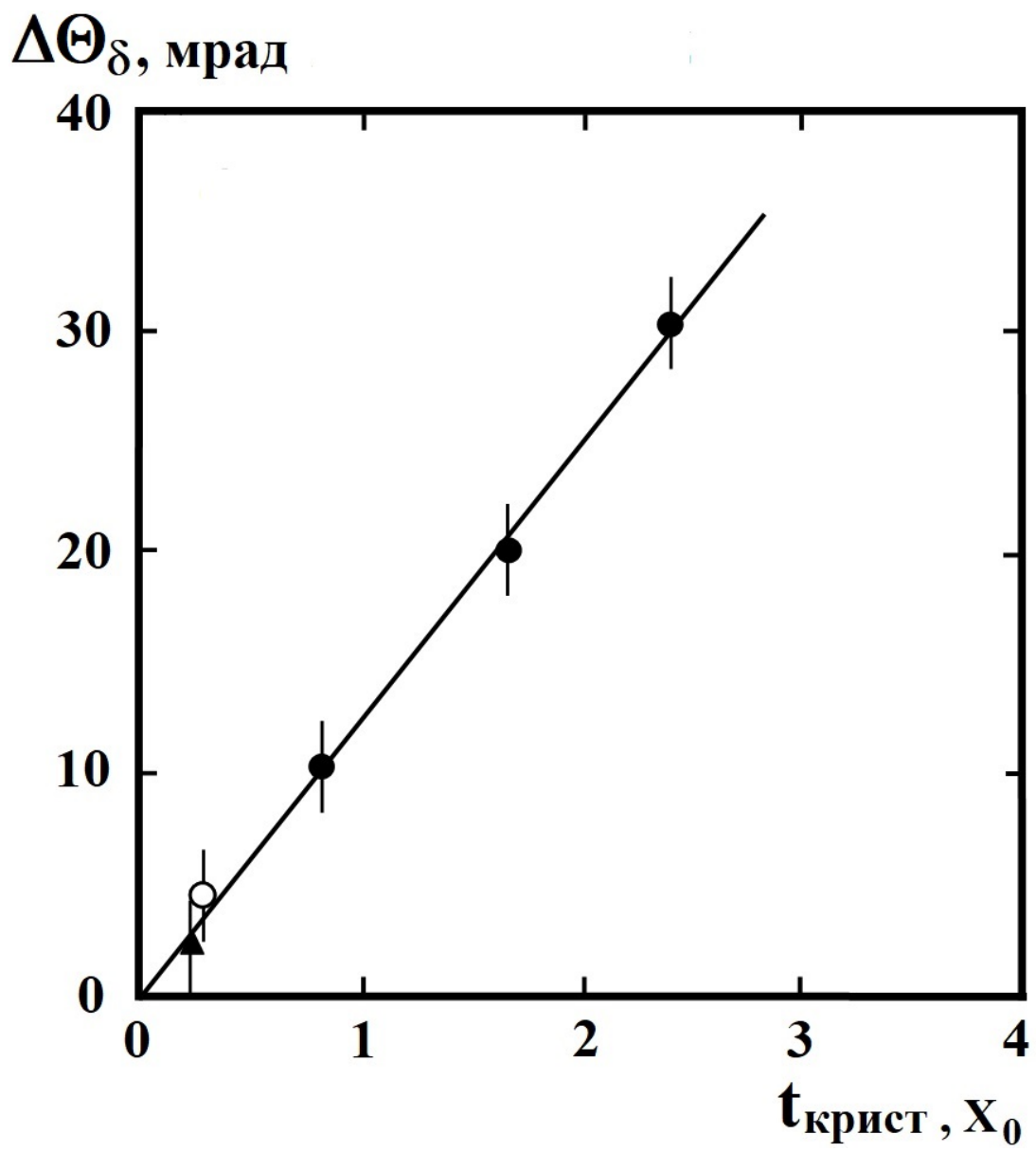


Рис. 11

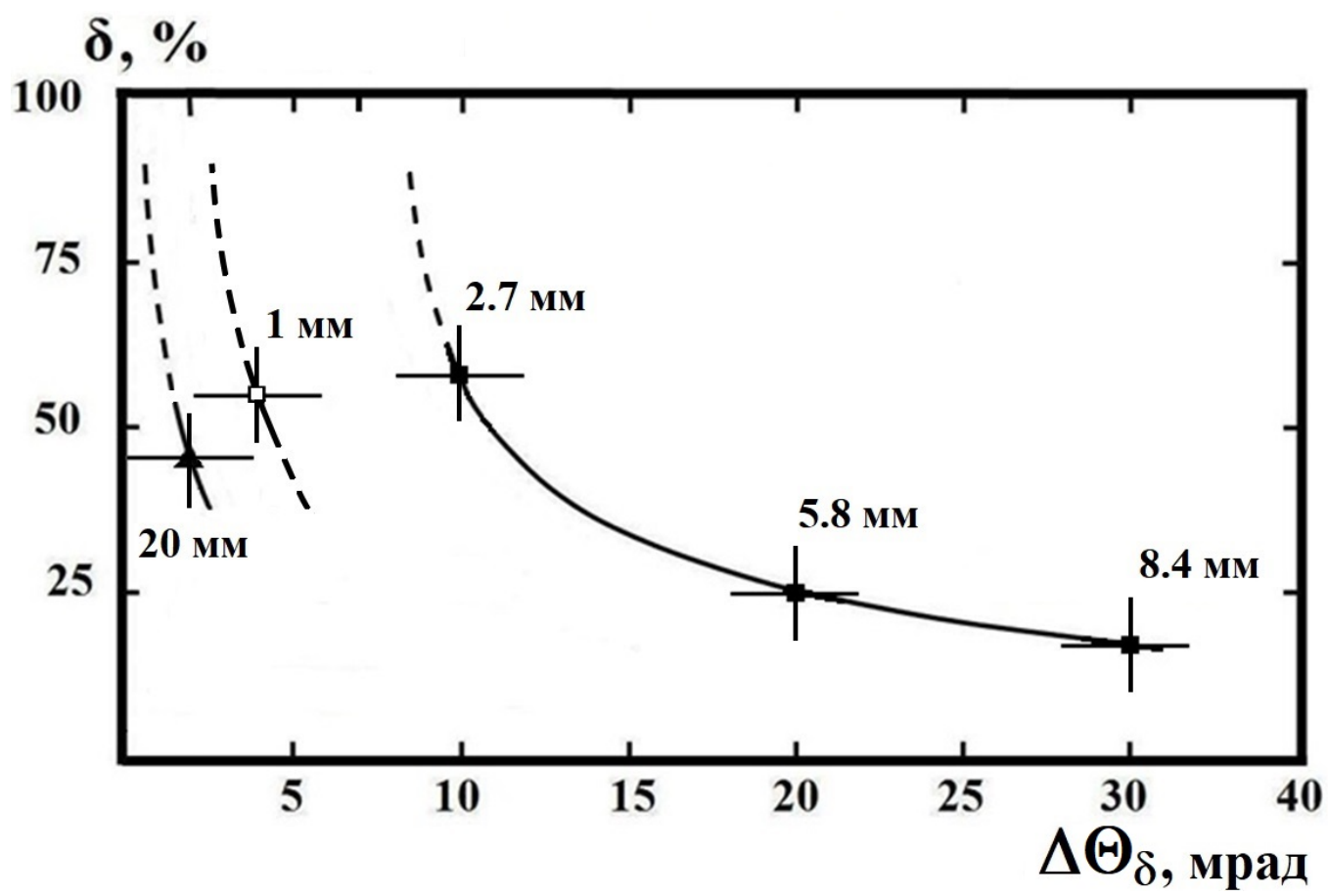


Рис. 12

Для связи с авторами:

Басков Владимир Алексеевич

Тел. 8-926-326-16-63 (моб.)

E-mail: paхра1@mail.ru

E-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

~~Для переводчика:~~

~~ENERGY RESOLUTION OF A SPECTROMETER WITH AN ORIENTED CRYSTAL CONVERTER~~

~~©2024 V. A. Baskov~~

~~P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow,~~

~~119991 Russia, 53 Leninsky Ave.~~

~~E-mail: baskov@x4u.lebedev.ru~~

~~The single-crystal converter oriented along the axis located in front of the electromagnetic spectrometer changes the response of the spectrometer registering electrons with energies in the tens of GeV. Depending on the orientation, thickness, type and temperature of the crystal converter and the thickness of the spectrometer, the relative energy resolution of the spectrometer improves by an amount from 15% to 80%.~~

~~**Keywords:** oriented crystal, converter, electromagnetic shower, electromagnetic spectrometer, spectrometer response, energy resolution.~~

~~REFERENCES~~

- ~~1. U. I. Uggerhoj The interaction of relativistic particles with strong crystalline fields // Reviews of Modern Physics, 2005, V.77, pp.1131-1172. .~~
- ~~2. V. N. Baer, V. M. Katkov, V. M. Strakhovenko Electromagnetic processes at high energy in oriented single crystals // Publishing house "Nauka", Novosibirsk, 1989 (in Russian).~~
- ~~3. A. I. Akhiezer, N. F. Shul'ga Contribution to the theory of electromagnetic showers in crystalline media // Sov. Phys. JETP, 1983, V. 58, pp.55-62.~~
- ~~4. V. A. Baskov Longitudinal development of electromagnetic showers in a directional spectrometer // Bullet Lebedev Phys. Inst., 2012, V. 39, pp.295-299,
<https://doi.org/10.3103/S1068335612100041>.~~
- ~~5. V. A. Baskov, V. V. Kim, B. I. Luehkov, V. Yu. Tugaenko, V. A. Khablo Orientation dependences of the response of an electromagnetic spectrometer with oriented crystal converter // Bullet Lebedev Phys. Inst., 2013, V. 40, pp. 109-112, <https://doi.org/10.3103/S1068335613050011>.~~
- ~~6. V. A. Baskov Effect of crystal temperature on parameters of electromagnetic shower // Bullet Lebedev Phys. Inst., 2015, V. 42, pp.93-95, <https://doi.org/10.3103/S1068335615040016>.~~

7. ~~V. A. Baskov Detection of high-energy electrons by a directional spectrometer // JEPT Letter, 2014, V. 99, pp. 675–678, <https://doi.org/10.1134/S0021364014120042>.~~
8. ~~M. Soldani, L. Bandiera, M. Moulson, G. Ballerini, V. G. Baryshevsky, L. Bomben, C. Brizzolari, N. Charitonidis, G. L. D’Alessandro, D. De Salvador, M. van Dijk, G. Georgiev, A. Gianoli, V. Guidi, V. Haurylavets, A. S. Lobko, T. Maiolino, V. Mascagna, A. Mazzolari, F. C. Petrucci, M. Prest, M. Romagnoni, P. Rubin, D. Soldi, A. Sytov, V. V. Tikhomirov, E. Vallazza Strong enhancement of electromagnetic shower development induced by high-energy photons in a thick oriented tungsten crystal // Eur. Phys. J. C, 2023, V. 83, Article number: 101, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11247-x>.~~
9. ~~V. A. Baskov, V. V. Kim, B. I. Luchkov, V. Yu. Tugaenko, V. A. Khablo Electromagnetic spectrometers based on transparent oriented crystals // Proceedings of the session-conference section Nuclear Physics Department of Physical Sciences Russian Academy of Sciences “Physics of fundamental interactions”, 21-25 November 2011, JETP, Moscow, p.16; http://matras.itcp.ru/npd2kl/Malyi_za/24_november/ba/ppt (in Russian).~~
10. ~~V. G. Zverev, B. I. Luchkov, V. Yu. Tugaenko On the possibility of creating a gamma-ray telescope with a monocrystalline converter // Cosmophysics, Publishing house “Energoizdat”, Moscow, 1987, pp. 71–75.~~
11. ~~V. A. Baskov Effect of an oriented crystalline converter on the electromagnetic spectrometer response // Bullet Lebedev Phys. Inst., 2016, V. 43, pp. 153–155, <https://doi.org/10.3103/S1068335616050018>.~~
12. ~~V. A. Baskov Energy dependence of the response of an electromagnetic spectrometer with oriented crystal converter // Bullet Lebedev Phys. Inst., 2014, V. 41, pp. 71–75, <https://doi.org/10.3103/S1068335614030051>.~~
13. ~~V. N. Bayer, V. A. Baskov, V. B. Ganenko, B. B. Govorkov, V. N. Zapolsky, V. V. Kim, L. Ya. Kolesnikov, B. I. Luchkov, V. A. Maishev, S. I. Nikolsky, A. L. Rubashkin, V. I. Sergienko, P. V. Sorokin, M. N. Strikhanov, V. Yu. Tugaenko, V. A. Khablo, P. A. Cherenkov Quantum electrodynamics in strong fields of oriented crystals (experimental design) // Preprint FIAN, Moscow, 1988 (in Russian).~~
14. ~~V. A. Baskov, V. A. Khablo, V. V. Kim, V. I. Sergienko, A tagging system for high-energy photons based on a multichannel lead-scintillator total-absorption spectrometer and using of spectrum shifters // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A, 1990, V. 297, pp. 329–334.~~
15. ~~V. A. Baskov, A. S. Belousov, V. V. Kim, E. I. Malinovskii, A. P. Usik, V. A. Khablo Spectrometers for recording electromagnetic showers emerging from oriented crystals // Instrum~~

~~Exp Tech, 2011, V. 54, pp. 660–667, <https://doi.org/10.1134/S002044121104018X>.~~

- ~~16. B. Slovinski Electromagnetic Showers Produced by Gamma Quanta and Electrons in Dense Amorphous Media // Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, 1994, V. 25, part 2, pp.417–495.~~
- ~~17. V. N. Goryachev, S. P. Denisov // Physics Atomic Nuclei, 2021, V. 84, pp.1577–1579, <https://doi.org/10.1134/S1063778821090106>~~
- ~~18. V. A. Baskov, B. B. Govorkov, V. V. Kim, B. I. Luchkov, V. I. Sergienko, V. Yu. Tugaenko, V. A. Khablo Application of oriented crystals in the spectrometry of gamma quanta and high-energy electrons // Bullet Lebedev Phys. Inst., 1992, V. 9/10, pp. 41–46 (in Russian).~~
- ~~19. V. V. Tikhomirov, V. V. Haurylavets, A. S. Lobko, V. A. Mechinsky Oriented Crystal Applications in High Energy Physics // International Conference on Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies (ISMART 2016: Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies, V. 200, pp. 259–280), Minsk, Belarus; https://doi.org/10.1007/978-3-319-68465-9_16.~~
- ~~20. K. Elsener, S. P. Møller, J. B. B. Petersen, E. Uggerhøj Ultrashort Electromagnetic Showers in Single Crystals: Applications in High Energy γ Ray Astronomy ? // Cosmic Gamma Rays, Neutrinos, and Related Astrophysics. NATO ASI Series, V. 270, pp 457–464, https://doi.org/10.1007/978-94-009-0921-2_31.~~
- ~~21. V. A. Baskov, V. V. Kim, B. I. Luchkov, V. Yu. Tugaenko, V. A. Khablo The effect of the temperature of the oriented crystal converter on the response of the spectrometer // Bullet Lebedev Phys. Inst., 2012, V. 39, pp. 229–233, <https://doi.org/10.3103/S1068335612080039>.~~
- ~~22. V. A. Baskov, V. V. Kim, B. I. Luchkov, V. Yu. Tugaenko, V. A. Khablo Multiplicity of charged particles in electron-induced showers developing in oriented silicon and tungsten crystals // Bullet Lebedev Phys. Inst., 2013, V. 40, pp. 104–107, <https://doi.org/10.3103/S1068335613040052>.~~
- ~~23. V. A. Baskov, V. V. Kim, B. I. Luchkov, V. Yu. Tugaenko, V. A. Khablo Charged particle multiplicity in showers formed by gamma-rays in oriented tungsten crystal // Bullet Lebedev Phys. Inst., 2011, V. 38, pp. 158–160, <https://doi.org/10.3103/S1068335611060029>.~~