

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П.Н.ЛЕБЕДЕВА

ПРЕПРИНТ

В.А.БАСКОВ, В.В. КИМ, В.А. ХАБЛО

**СОСТАВНЫЕ ЛИВНЕВЫЕ
СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ
ЭЛЕКТРОНОВ И ФОТОНОВ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

В ПЕЧАТЬ, В СВЕТ!

**Зам. директора ФИАН,
док. физ. - мат. наук**

Гиппиус А.А.

МОСКВА 2010

СОСТАВНЫЕ ЛИВНЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ И ФОТОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В.А. Басков*, В.В. Ким, В.А. Хабло

А Н Н О Т А Ц И Я

Представлены конструкция и основные характеристики составных ливневых спектрометров: составного черенковского ливневого спектрометра (СЧЛС) и свинцово-сцинтилляционного ливневого спектрометра (ССЛС), состоящих из десяти независимых светоизолированных счетчиков толщиной $1X_0$ и $1,18X_0$, соответственно. Спектрометры предназначены для исследования развития электромагнитных ливней в ориентированных кристаллах. Исследованы дифференциальные и интегральные кривые развития ливня в спектрометрах, энергетическое разрешение в зависимости от толщины разориентированных кристаллических конверторов перед ними. Энергетическое разрешение СЧЛС и ССЛС совместно с черенковским спектрометром (ЧС) толщиной $15 X_0$, располагавшегося за СЧЛС и ССЛС, при энергии электронов $E_e = 28$ ГэВ составило 2,4% и 4,3% для СЧЛС и ССЛС, соответственно.

COMPOUND SHOWER SPECTROMETERS FOR REGISTRATION HIGH ENERGY ELECTRONS AND PHOTONS

V.A. Baskov*, V.V. Kim, V.A. Khablo

ABSTRACT

The design and the basic characteristics of compound shower spectrometers are presented: a cherenkov shower spectrometer (ChSS) and a lead scintillation shower spectrometer (LSSS), consisting of ten independent lightproof counters thickness $1X_0$ and $1,18X_0$, accordingly. Spectrometers are intended for research of development of electromagnetic showers in the oriented crystals. Differential and integrated curve developments of a shower in spectrometers, the energy resolution depending on a thickness disoriented crystal converters before them are investigated. Energy resolution ChSS and LSSS together with a cherenkov spectrometer (ChS) thickness $15X_0$ settled down for ChSS and LSSS at energy electrons $E_e = 28$ GeV has made 2,4% and 4,3% for ChSS and LSSS, accordingly.

* - baskov@x4u.lebedev.ru

Введение

В рамках программы “Квантовая электродинамика в сильных полях ориентированных кристаллов” на электронном канале 2В ускорителя У-70 Института Физики Высоких Энергий в Протвино на установке “Каскад” [1] были проведены исследования развития электромагнитных ливней от γ -квантов и электронов с энергиями в десятки ($E \leq 30$ ГэВ) в полях осей и плоскостей ориентированных кристаллов (кристалл является ориентированным, если угол θ между импульсом частицы и осью или плоскостью кристалла составляет $\theta = 0$; кристалл является разориентированным, если $\theta \gg 0$). Изучалось продольное развитие ливней в зависимости от толщины, типа, температуры кристалла; исследовались угловые зависимости параметров ливней и т. д. [2-5].

Регистрации электромагнитных ливней, выходящих из кристалла, проводилась составными ливневыми спектрометрами (СЛС), помещавшимися за кристаллом.

В работе представлены конструкция, основные характеристики СЛС и описана методика калибровки СЛС на пучке электронов и фотонов высоких энергий, представлены зависимости развития ливней в СЛС от толщины разориентированного кристалла (конвертора), который в этом случае являлся аморфным веществом.

Установка

Схема установки “Каскад” представлена на рис. 1. Сцинтилляционные счетчики А1-А3, С1-С6 формировали триггер. Пропорциональные камеры ПК1-ПК3 использовались для определения координат входа каждого электрона в кристалл [1].

Сцинтилляционный счетчик Т предназначался для определения средней множественности заряженных частиц в ливнях, выходящих из кристалла [4].

Для создания пучка фотонов использовалась амплитудно-координатная система мечения фотонов на основе многоканального свинцово-сцинтилляционного спектрометра полного поглощения на сместителях спектра

(МСППС) [6].

В работе использовались кристаллы кремния, вольфрама, граната и вольфрамата разной толщины.

В эксперименте использовались пучки электронов с энергиями $E_e = 26$ и 28 ГэВ с импульсным разбросом $0,76$ ГэВ/с и расходимостью $|\nu| \leq 0,1$ мрад.

Ливень, выходящий из кристалла, продолжал развиваться в составном ливневом спектрометре СЛС.

Составные ливневые спектрометры

Составной ливневый спектрометр СЛС предназначен для исследования развитие электромагнитных ливней в ориентированных кристаллах. Характеристики электромагнитных ливней в кристаллах определялись по анализу формы каскадных и интегральных кривых в СЛС.

В исследованиях использовались два типа составных спектрометров: черенковский ливневый спектрометр (СЧЛС) и составной свинцово-сцинтилляционный ливневый спектрометр (ССЛС).

Составной черенковский ливневый спектрометр (СЧЛС)

СЧЛС состоял из 10 одинаковых независимых светоизолированных счетчиков, с каждого из которых можно было с помощью ФЭУ снимать амплитудный сигнал. Каждый счетчик СЧЛС (рис. 2) представлял из себя радиатор из свинцового стекла ТФ-1 размером 100×100 мм² и толщиной 2,5 см или $1X_0$ (X_0 – радиационная длина).

Для снятия светового сигнала было предусмотрено использование двух ФЭУ-85, работающих независимо друг от друга [7]. Для формирования сигналов с ФЭУ использовались стандартные делители. Фотокатоды ФЭУ непосредственно прилегали к торцу радиатора и для лучшего светосбора на фотокатоды ФЭУ была нанесена светопроводящая смазка. В исследованиях ливневых процессов в кристаллах использовался одно ФЭУ.

Радиатор вместе с ФЭУ и делителями закреплялись на стальной конструкции и помещались в тонкий стальной корпус. Радиатор счетчика обертывался алюминизированным майларом, светонепроницаемой черной бумагой и дополнительно обертывался черной изолентой.

За СЧЛС для сбора оставшейся части ливня помещался черенковский спектрометр ЧС толщиной $15X_0$. ЧС имел шестигранный радиатор из свинцового стекла ТФ-1 с диаметром вписанной окружности 180 мм [8].

Свинцово-сцинтилляционный ливневый спектрометр (ССЛС)

ССЛС состоял из 10 одинаковых независимых светоизолированных счетчиков, с каждого из которых можно было с помощью ФЭУ снимать амплитудный сигнал. Каждый счетчик ССЛС (рис. 3) состоял из четырёх пластин свинца толщиной 1,5 мм и размером 90×90 мм², прослоенных четырьмя пластинами пластического сцинтиллятора такого же размера и толщиной 5 мм. Все грани сцинтилляторов были отполированы и кроме одной обёрнуты алюминизированным майларом. Радиационная толщина счетчика составила $1,18X_0$.

Для регистрации светового потока, выходящего из сцинтилляторов, использовался один ФЭУ-85. ФЭУ вместе со стандартным делителем закреплялись на стальной направляющей так, чтобы фотокатод ФЭУ был направлен на грани сцинтилляторов не обёрнутых майларом. Световой поток, выходящий из сцинтилляторов, попадал на фотокатод ФЭУ через воздушный промежуток длиной 100 мм. Для лучшего светособирания между свинцово-сцинтилляционной сборкой и ФЭУ был создан светоотражательный конус из алюминизированного майлара.

Для сбора оставшейся части ливня за ССЛС также помещался черенковский спектрометр ЧС.

Калибровка СЛС

Калибровка составного ливневого спектрометра проводилась методом

“сдвижки каскадной кривой”, которая применялась при калибровке СЧЛС при энергиях частиц $E_e \leq 1$ ГэВ в работе [7]. Так как СЧЛС и ССЛС использовались для регистрации электронов и фотонов при энергиях в диапазоне $E = 3 \div 30$ ГэВ, то были проведены новые калибровки детекторов электронами с энергией $E_e = 26$ ГэВ и $E_e = 28$ ГэВ.

Этапы калибровки СЛС на примере СЧЛС показаны в таблице 1.

На первом этапе (колонка 1) на электронном пучке проходила калибровка черенковского спектрометра ЧС, с помощью которой определялся коэффициент C_{11} , связывающий энерговыделение в ЧС с амплитудой сигнала ($C_{11} = E_e / \langle A_{k,11} \rangle$), где E_e – средняя энергия электронов в пучке; $\langle A_{k,11} \rangle$ – средняя амплитуда сигнала ЧС, который по порядку считался счетчиком под номером $i = 11$; $k = 0, 9, 10$ – число счетчиков СЧЛС перед ЧС; при $k = 0$ перед ЧС счетчики отсутствуют). На первом этапе перед ЧС счетчики СЧЛС отсутствовали ($C_{11} = E_e / \langle A_{0,11} \rangle$).

На втором этапе (колонка 2) перед ЧС помещалось 9 счетчиков СЧЛС и определялись средние амплитуды сигналов $\langle A_{9,i} \rangle$ в СЧЛС (i – номер счетчика СЧЛС по пучку; $i = 1 \dots 9$). В этом случае среднее энерговыделение ливня в ЧС определялось как $\langle E_{9,11} \rangle = \langle A_{9,11} \rangle \cdot C_{11}$.

На третьем этапе (колонка 3) к 9 счетчикам СЧЛС добавлялся ещё один счетчик и определялись средние амплитуды сигналов в СЧЛС ($\langle A_{10,i} \rangle$; $i = 1 \dots 10$), среднее энерговыделение в ЧС ($\langle E_{10,11} \rangle = \langle A_{10,11} \rangle \cdot C_{11}$) и суммарное среднее энерговыделение в десяти счетчиках СЧЛС ($\langle \Delta E \rangle = E_e - \langle E_{10,11} \rangle$).

На четвёртом этапе (колонка 4) определялся максимум каскадной кривой среднего энерговыделения ливня в СЧЛС. Начиная с $i = 2$ определялся знак разности средних амплитуд, представленных в колонках 2 и 3 ($\langle \Delta A_i \rangle = \langle A_{10,i} \rangle - \langle A_{9,i} \rangle$; $i = 2 \dots 10$). Максимум каскадной кривой при $E_e = 26$ и 28 ГэВ приходится на $\approx 7,5X_0$ или на 8-й счетчик СЧЛС. В колонках 2 и 3 это счетчики с номерами $i = 9$ и $i = 8$ соответственно. Поэтому, для колонки 3 $\langle \Delta A_i \rangle \geq 0$ при $i \leq 8$ и $\langle \Delta A_i \rangle < 0$ при $i > 8$, то есть каскадная кривая сдвинулась на $1X_0$, равной толщине счетчика СЧЛС.

На пятом этапе (колонка 5) происходил переход от амплитуд в счетчиках, выраженной в каналах АЦП, к относительным амплитудам или к амплитудам, нормированным на амплитуду счетчика, на который приходится максимум каскадной кривой. Переход к относительным амплитудам осуществлялся следующим образом: амплитуда сигнала со счетчика, в котором находился максимум ливня, принимался за единицу ($\langle A_{9,i}^{\text{отн}} \rangle = \langle A_{10,i}^{\text{отн}} \rangle = 1$; $i = 8$); тогда амплитуда сигналов в других счетчиках представлялась в долях от максимума каскадной кривой по формулам, представленных в таблице 2. Результаты нормировки представлены колонках 4 и 5 таблицы 1.

На шестом этапе (колонка 6) определялась энергия ливня, выделившаяся в каждом счетчике ЧЛС. Для этого, суммированием относительных амплитуд колонки 3, определялась суммарная относительная амплитуда в десяти

счетчиках СЧЛС ($\langle A \rangle = \sum_{i=1}^{10} \langle A_{10,i}^{\text{отн}} \rangle$), которой соответствовала средняя энергия ливня $\langle \Delta E \rangle$, выделившаяся в СЧЛС, определенная на третьем этапе. Далее, по формуле $\langle \Delta E_i \rangle = (\langle \Delta E \rangle / \langle A \rangle) \cdot \langle A_{10,i}^{\text{отн}} \rangle$ определялась средняя энергия ливня, выделившаяся в каждом счетчике СЧЛС ($i = 1 \dots 10$).

На седьмом (колонка 7) последнем этапе определялись коэффициенты C_i , связывающие энерговыделения в счетчиках СЧЛС, с их амплитудами ($C_i = \langle \Delta E_i \rangle / \langle A_{10,i} \rangle$, $i = 1 \dots 10$).

Продольное развитие электромагнитных ливней в СЛС

Максимумы каскадных кривых при энергиях электронов и γ -квантов с энергиями около 30 ГэВ, как отмечено выше, приходятся на толщину спектрометра, составляющую $8X_0$. Поэтому использование 10 счетчиков толщиной в $1X_0$ и $1,18X_0$ оказывается разумным, поскольку в этом случае развитие электромагнитных ливней можно проследивать до максимума и за максимумом каскадной кривой вплоть до $10X_0$ при использовании СЧЛС и до $\approx 12X_0$ при использовании ССЛС.

Суммирование сигналов соседних счетчиков даёт возможность увеличивать толщину ячейки спектрометра, а последовательное суммирование сигналов счетчиков даёт возможность составлять спектрометры толщиной от $1X_0$ до $10X_0$ в случае СЧЛС и от $1,18X_0$ до $11,8X_0$ в случае ССЛС. Суммирование сигналов с СЧЛС и ЧС, и ССЛС и ЧС даёт возможность составить спектрометры толщинами $25X_0$ и $26,8X_0$ соответственно.

а. Каскадные кривые

На рис. 4 показаны каскадные кривые развития электромагнитных ливней в СЧЛС и ССЛС при энергии электронов $E_e = 26$ ГэВ и $E_e = 28$ ГэВ. На рисунках К – калибровочная кривая, то есть отсутствие кристалла перед спектрометром. Наличие кристалла перед спектрометром ведет к сдвигу каскадной кривой в сторону начала развития ливня, то есть в кристалл. На рисунках хорошо видна сдвигу каскадной кривой в конвертор или в разориентированный кристалл вольфрама ($X_0 = 3,5$ мм), являющейся в этом случае аморфным [5].

Характер развития ливня от электронов за максимумом каскадной кривой представлен на рис. 5 [3,5]. На рисунке представлено относительное энерговыделение в ЧС от толщины конвертора перед ним ($\langle \Delta E_{\text{ЧС}} \rangle / E_e$, где $\langle \Delta E_{\text{ЧС}} \rangle$ - среднее энерговыделение в ЧС; $E_e = 26$ ГэВ – средняя энергия электронов в пучке). В качестве конверторов выступают счетчики СЧЛС и разориентированные кристалла граната и вольфрама. Экстраполяция кривой в сторону увеличения толщины конвертора перед ЧС показывает, что электромагнитный каскад простирается вплоть до толщины конвертора перед ЧС $t_{\text{СЧЛС+кристалл}} \sim 16X_0$ или до толщины системы кристалл+СЧЛС+ЧС $\sim 31X_0$.

На рис 6. показаны каскадные кривые развития электромагнитных ливней в СЧЛС при трёх энергиях γ -квантов. Видно, что каскадные кривые “стандартно” изменяются при увеличении энергии: увеличивается среднее энерговыделение в счетчиках и происходит сдвигу каскадных кривых в глубь СЧЛС ($t_{\text{max}} \sim \ln E_\gamma$, где t_{max} – глубина СЧЛС, на который приходится максимум каскадной кривой; E_γ – энергия γ -квантов) [9].

6. Интегральные кривые

Последовательное суммирование сигналов счетчиков СЧЛС даёт возможность регистрировать энерговыделение в детекторах разной толщины и построить интегральную кривую. На рис. 7 показаны интегральные кривые развития электромагнитного ливня в системе СЧЛС и ЧС при энергии электронов $E_e = 26$ ГэВ (К – калибровочная кривая, то есть отсутствие конвертора перед спектрометром). При наличии конвертора перед системой также видна сдвигка кривой к началу развития ливня.

На рис. 7 виден и “недобор” энергии ливня системой СЧЛС и ЧС при наличии конвертора перед ней. Зависимость энергии ливня, “недобранной” системой СЧЛС и ЧС от толщины конвертора показана на рис. 8. Этот “недобор” объясняется: поглощением части ливня кристаллом; многократным рассеиванием ливня на воздухе между кристаллом и СЧЛС; выходом части ливня через боковые стороны СЧЛС и ЧС; выходом части ливня через заднюю часть ЧС.

Энергетическое разрешение СЛС

а. Энергетическое разрешение систем СЛС с разориентированным кристаллическим (аморфным) конвертером

Зависимость относительного энергетического разрешения СЛС на примере СЧЛС от толщины СЧЛС и толщины кристаллического конвертора (вольфрам, угол разориентации $\Theta \geq 23$ мрад относительно оси $\langle 111 \rangle$) перед СЧЛС, начиная с толщины СЧЛС $1X_0$ вплоть до толщины системы СЧЛС и ЧС $25X_0$, показана на рис. 9. На рисунке К – калибровочная кривая (отсутствие конвертора перед СЧЛС). Из рисунка видно, что вплоть до толщин спектрометров $16X_0 \div 18X_0$ энергетическое разрешение СЧЛС улучшается независимо от толщины конвертора. Более детально зависимости энергетического разрешения СЧЛС и системы СЧЛС и ЧС от толщины конвертора перед СЧЛС показаны на рис. 10 и рис. 11 [10].

Из рис. 10 видно, что энергетическое разрешение СЧЛС улучшается как с толщиной спектрометра, так и с толщиной конвертора. Спектрометр большой толщины (система СЧЛС и ЧС) имеет наилучшее энергетическое разрешение при отсутствии конвертора, а при увеличении его толщины энергетическое разрешение ухудшается (рис. 11).

Таким образом, для каждой толщины СЧЛ существует толщина конвертора, при которой СЛС имеет наилучшее разрешение. Например, для СЧС толщиной около $25X_0$, то есть для СЧЛС и ЧС, энергетическое разрешение наилучшее при отсутствии конвертора.

б. Энергетическое разрешение систем СЧЛС и ЧС, ССЛС и ЧС

Энергетические разрешения системы СЧЛС и ЧС, а также ССЛС и ЧС, полученные в результате калибровок, проведенных на пучке электронов с $E_e = 28$ ГэВ (с вычетом разрешения пучка) дали следующие результаты:

$$\sigma/E_e = 2,4\% \text{ для СЧЛС и ЧС, } \sigma/E_e = 4,3\% \text{ для ССЛС и ЧС.}$$

То есть, система СЧЛС и ЧС имеет “стандартное” разрешение, характерное для детекторов такого типа – черенковских детекторов, энергетическое разрешение которых ограничивается статистикой фотоэлектронов.

Система ССЛС и ЧС имеет в ≈ 2 раза разрешение лучше, чем разрешение подобных детекторов типа “сэндвич” с толщиной свинцовых пластин 1- 2 мм и сцинтилляционных пластин 5 мм. Улучшение связано с регистрацией ЧС части ливня, выходящего из ССЛС. ЧС “исключает” вклад в полное разрешение системы ССЛС и ЧС сэмплинг-флуктуаций, флуктуаций длин треков и флуктуаций Ландау, которые могли быть если вместо ЧС использовался свинцово-сцинтилляционный спектрометр такой же толщины.

Заключение

Составные ливневые спектрометры СЛС показали возможность с хорошей точностью регистрировать продольное развитие электромагнитных ливней от его начала до полного затухания.

Методика калибровки спектрометров “сдвижкой каскадной кривой” позволила правильно “восстановить” каскадную кривую в СЛС использованием только одной энергией электронов, что важно при проведении экспериментов с ограниченным диапазоном энергий первичных частиц.

Исследованы зависимости энергетического разрешения от толщины СЛС и толщины конвертора перед СЛС. Определено, что для каждой толщины СЛС существует толщина конвертора, при которой энергетическое разрешение СЛС наилучшее.

Система СЛС совместно с черенковским спектрометром ЧС, который также можно рассматривать как часть СЛС, имеет хорошее энергетическое разрешение.

Конструкция и характеристики СЛС дают возможность использовать их совместно с другими спектрометрами, применять их в новых экспериментах.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Е.И. Тамму: Reference source not found и Е.И. Малиновскому за поддержку работы; А.С. Белоусову и А.П. Усику за возможность в эксперименте использовать составной черенковский ливневый спектрометр; В.И. Сергиенко за практическое руководство и организацию работ, Б.И Лучкову (МИФИ) и В.Ю. Тугаенко (МИФИ) за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

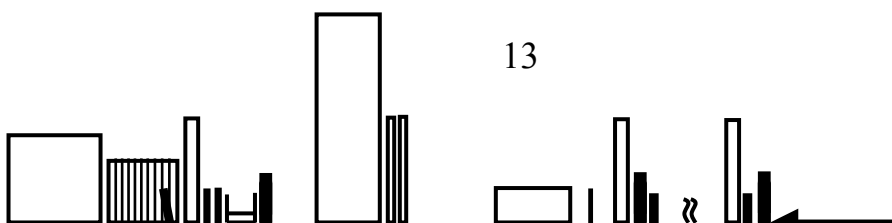
1. Басков В.А., Ким В.В., Коноров И.В., Сергиенко В.И., Хабло В.А. // ПТЭ, 1990, №5, С. 58.
2. Басков В.А., Ганенко В.Б., Гуцин В.А., Жебровский Ю.В., Ким В.В., Колесников Л.Я., Коноров И.В., Лучков Б.И., Машиев В.А., Рубашкин А.Л., Сергиенко В.И., Тугаенко В.И., Хабло В.А. // ПТЭ, 1992, №5, С. 52.
3. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V., Luchkov B.I., Sergienko V.I., Tugaenko V.Yu. // Nucl. Instrum. and Methods, 1998, V. **B145**, P. 92.
4. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.И., Хабло В.А. // Препринт ФИАН, №9, Москва, 2005.
5. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.И., Хабло В.А. // Препринт ФИАН, №31, Москва, 2006.
6. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V., Sergienko V.I. // Nucl. Instrum. and Methods, 1990, V. **A297**, P. 329.
7. Белоусов А.С., Ваздик Я.А., Малиновский Е.И., Самедов В.В., Смирнов П.А., Соловьев Ю.В., Столяров Е.Л., Усик А.П. Фоменко А.М. // Препринт ФИАН, №266, Москва, 1986.
8. Александров Ю.А., Баранов С.С., Белоусов А.С., Буданов Н.П., Ваздик Я.А., Говорков Б.Б., Ким В.В., Клименко И.Н., Козлов В.А., Крейскоп Л.М., Машиев В.А., Малиновский Е.И., Павловская В.В., Сергиенко В.И., Соловьев Ю.В., Тамм Е.И., Фролов А.М., Хабло В.А. // Препринт ФИАН, №31, Москва, 1979.
9. Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П. // Прохождение частиц высоких энергий через вещество, Энергоатомиздат, 1985, Москва.
10. Басков В.А., Говорков Б.Б., Ким В.В., Лучков Б.И., Сергиенко В.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А. // Краткие сообщения по физике ФИАН, 1992, №9,10, Москва, С.41.

Таблица 1 Схема калибровки СЧЛС и ЧС “методом сдвигки каскадной кривой” ($E_e = 26$ ГэВ).

№ счетчика, i	<A _{k,i} >, каналы			<A ^{отн} _{k,i} >		<ΔE _i >, ГэВ	C _i
	1	2	3	4	5		
	k=0	k=9	k=10	k=9	k=10		
1			100		0,0186	0,055	0,000550
2		166	550	0,0186	0,0618	0,183	0,000333
3		330	1085	0,0618	0,2031	0,600	0,000553
4		1167	2240	0,2031	0,3898	1,151	0,000514
5		1628	2640	0,3898	0,6321	1,867	0,000707
6		2560	3318	0,6321	0,8193	2,419	0,000729
7		3816	4500	0,8193	0,9661	2,853	0,000634
8		5000	5175	0,9661	1,0000	2,953	0,000571
9		4800	4596	1,0000	0,9576	2,827	0,000615
10		6350	6022	0,9576	0,9081	2,682	0,000445
11 (ЧС)	5410	2240	1750			8,410	0,004806
СЧЛС+ЧС						26,000	

Таблица 2 Формулы для определения относительной амплитуды счетчиков СЧЛС при калибровке СЧЛС и ЧС “методом сдвигки каскадной кривой” (E_c = 26 ГэВ).

Последовательность вычислений	Диапазоны	i	Формула
1	Максимум каскадной кривой	8	$\langle A_{9,i}^{отн} \rangle = \langle A_{10,i}^{отн} \rangle = 1$
2	До максимума каскадной кривой	7...2	$\langle A_{9,i}^{отн} \rangle = (\langle A_{9,i} \rangle / \langle A_{10,i+1} \rangle) \cdot \langle A_{10,i+1}^{отн} \rangle$ $\langle A_{9,i}^{отн} \rangle = \langle A_{10,i}^{отн} \rangle$
3	За максимумом каскадной кривой	9,10	$\langle A_{10,i}^{отн} \rangle = (\langle A_{10,i} \rangle / \langle A_{9,i-1} \rangle) \cdot \langle A_{9,i-1}^{отн} \rangle$ $\langle A_{10,i}^{отн} \rangle = \langle A_{9,i}^{отн} \rangle$



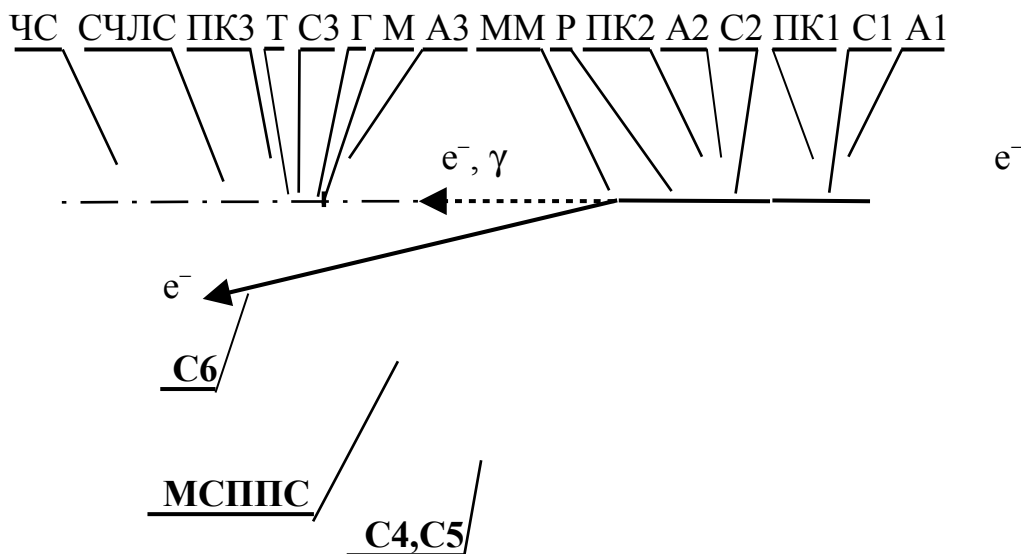


Рис. 1 Схема экспериментальной установки “Каскад”.

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 (ССЛС) – составной черенковский ливневый спектрометр (составной свинцово-сцинтилляционный ливневый спектрометр); ЧС – черенковский спектрометр;
 МСППС – многоканальный свинцово-сцинтилляционный спектрометр полного поглощения.

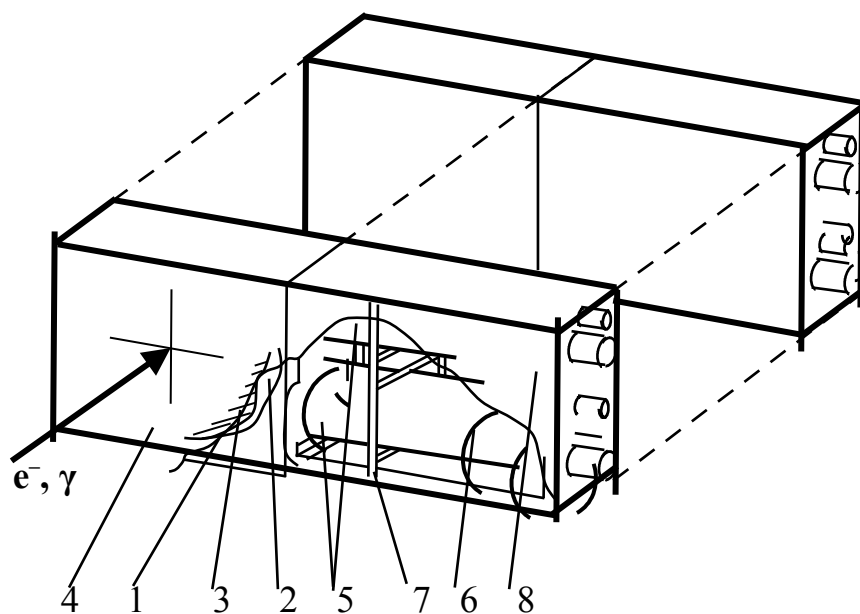
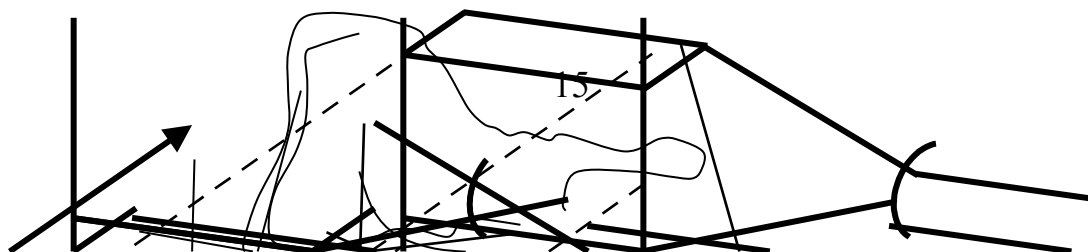


Рис. 2 Составной черенковский ливневый спектрометр (СЧЛС):
 1 – радиатор (свинцовое стекло ТФ-1); 2 – алюминизированный майлар; 3 – черная светонепроницаемая бумага; 4 – черная изоляционная лента; 5 – ФЭУ-85; 6 – делитель; 7 – крепления радиатора, ФЭУ и делителей; 8 – корпус.



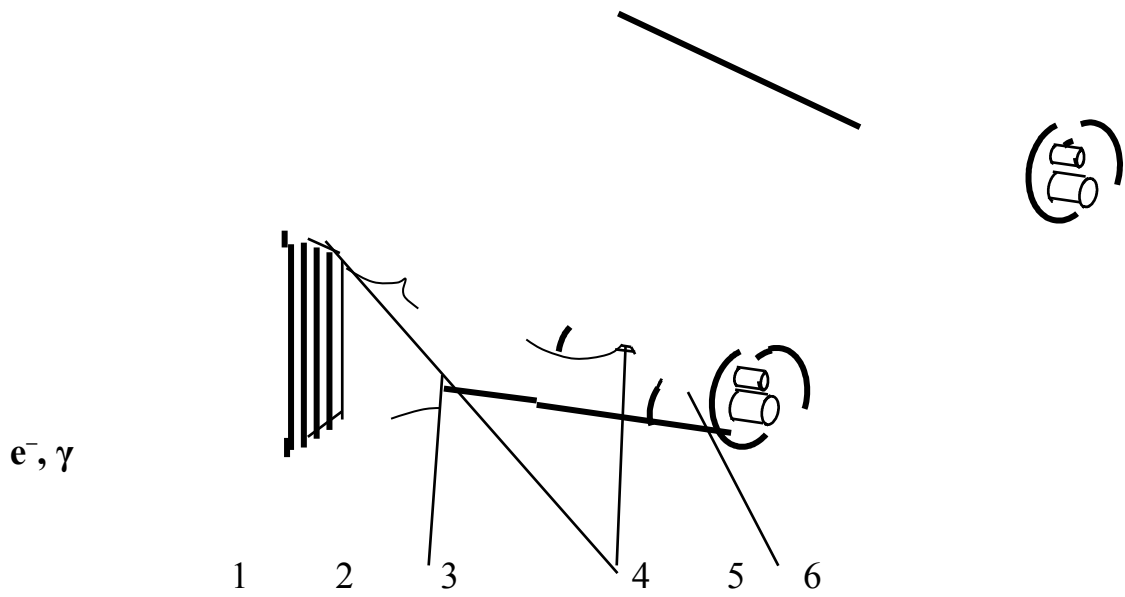
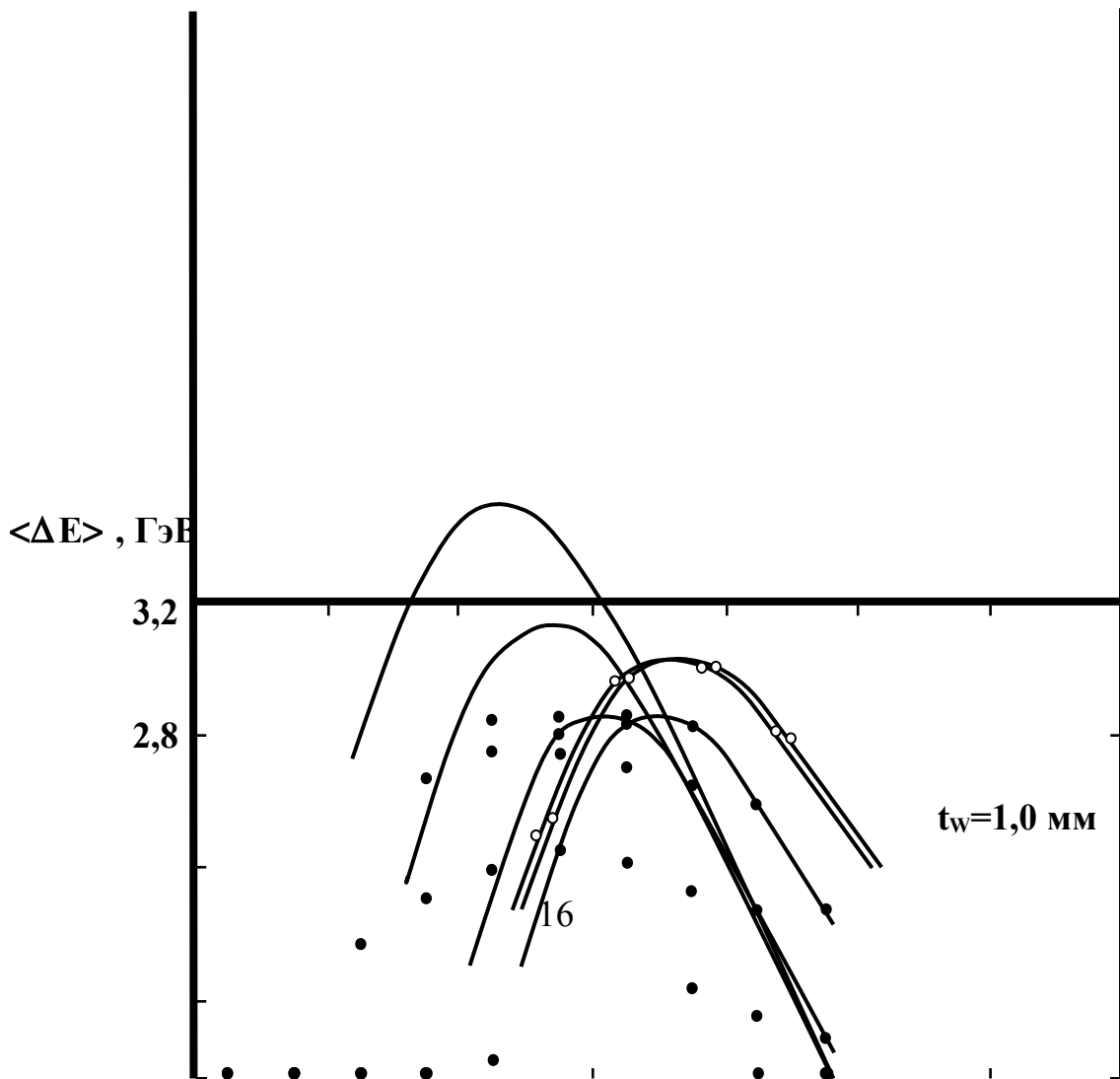


Рис. 3 Составной свинцово-сцинтилляционный ливневый спектрометр (СЛСЛ): 1 – свинцово-сцинтилляционная сборка; 2 – алюминизированный майлар; 3 – ФЭУ; 4 – направляющая; 5 – делитель; 6 – стальной стакан.



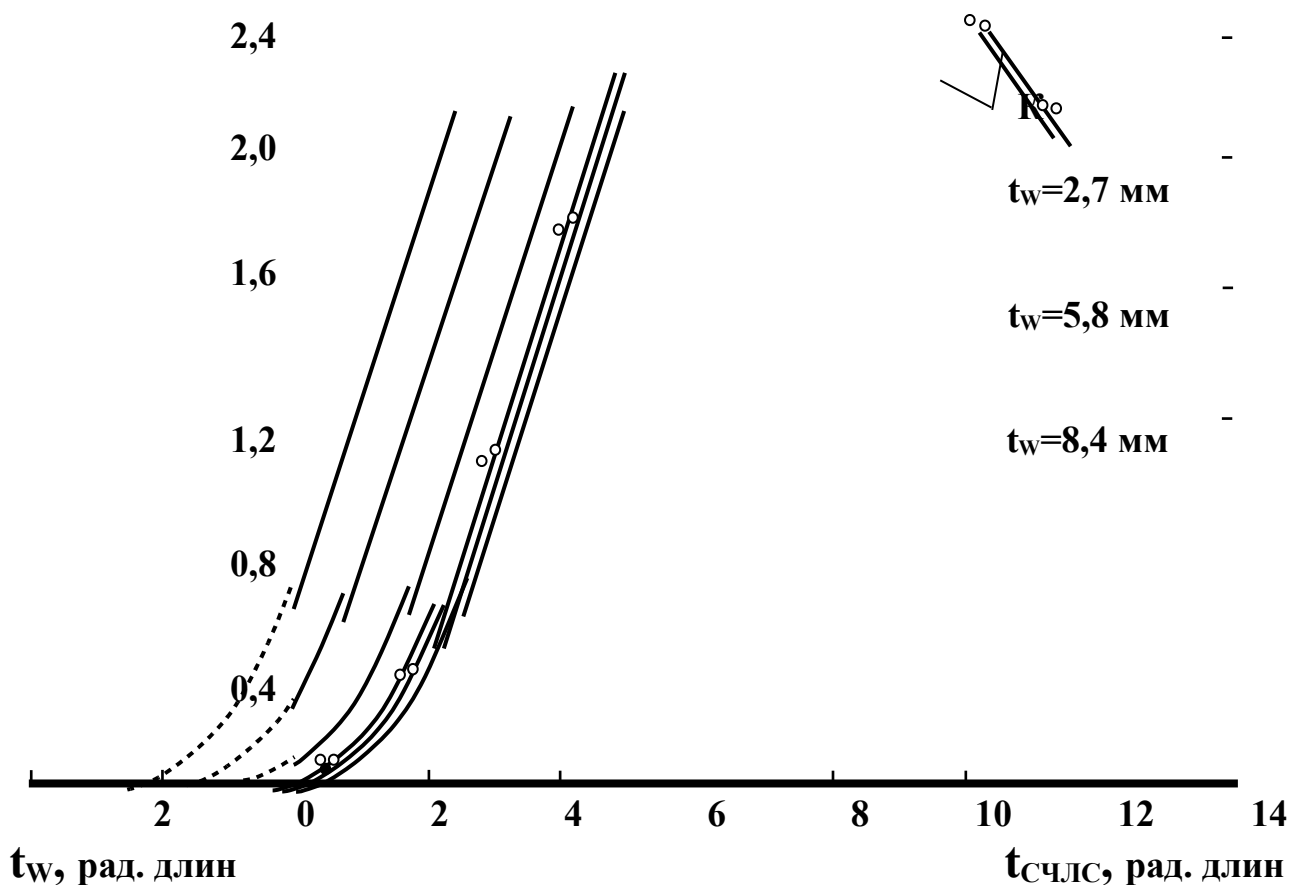
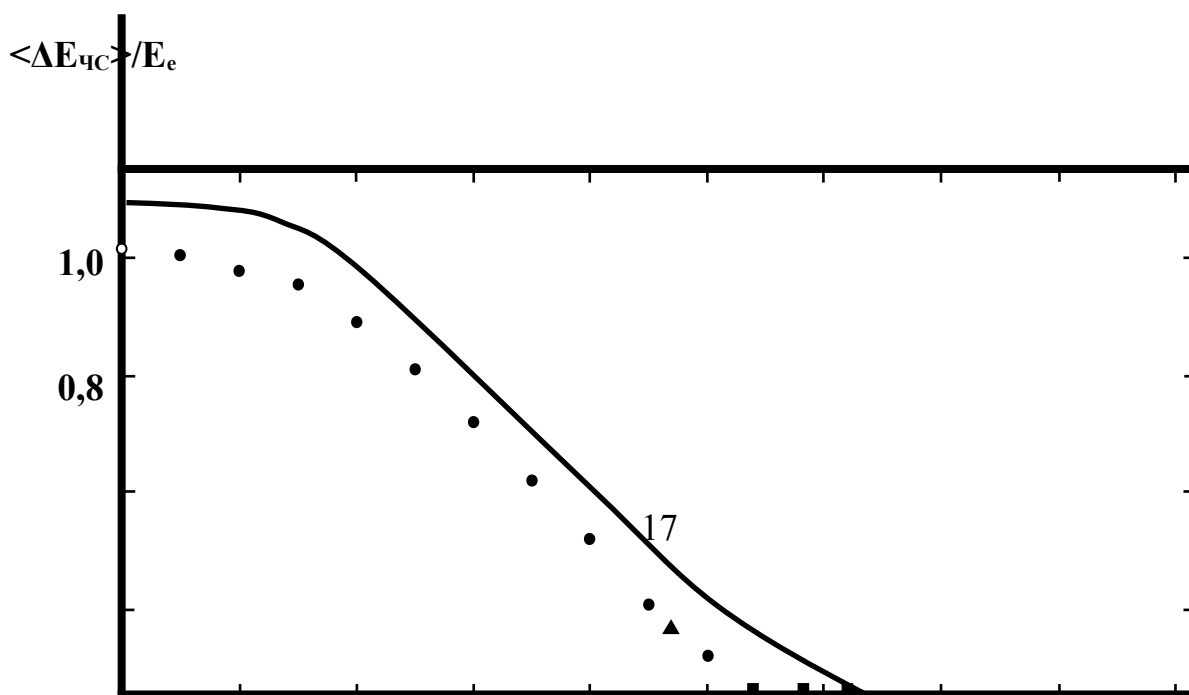


Рис. 4 Каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов с энергией $E_e = 26 \text{ ГэВ}$ (●) и $E_e = 28 \text{ ГэВ}$ (○) при разных толщинах разориентированных кристаллов вольфрама (К – кристалл перед СЧЛС отсутствует; $\langle \Delta E \rangle$ - средняя энергия ливня, выделившаяся в счетчике СЧЛС).



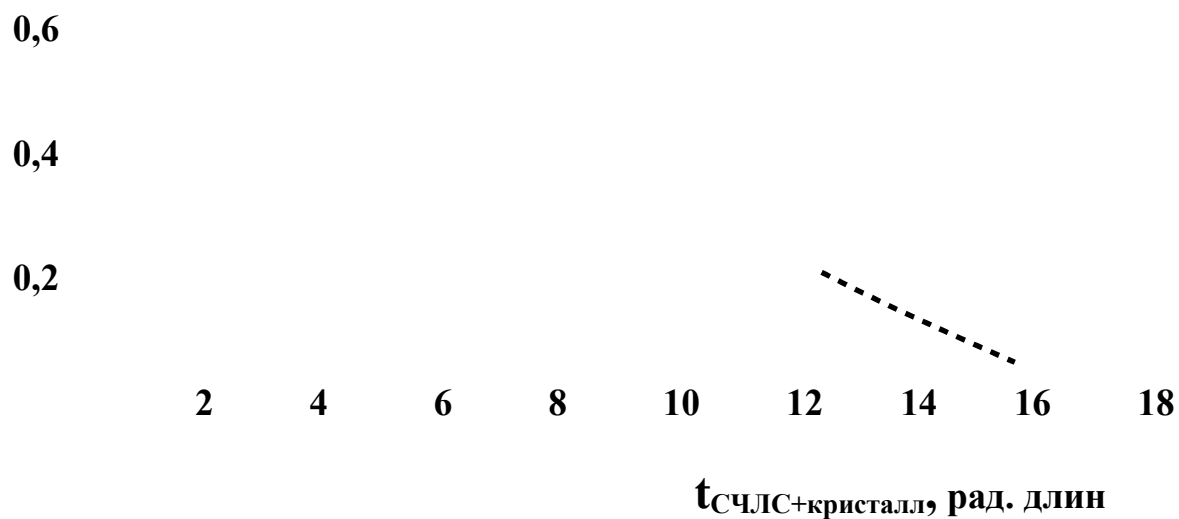


Рис. 5 Зависимость отношения энергии, выделившейся в ЧС, к средней энергии электронов в пучке ($E_e = 26$ ГэВ), от толщины конвертора, перед ним: \circ – конвертор отсутствует;
 \bullet - СЧЛС;
 \blacktriangle – разориентированный кристалл граната толщиной 50 мм;
 \blacksquare – разориентированные кристаллы вольфрама толщиной 2,7 мм, 5,8 мм и 8,4 мм мм.

$\langle \Delta E \rangle$, ГэВ

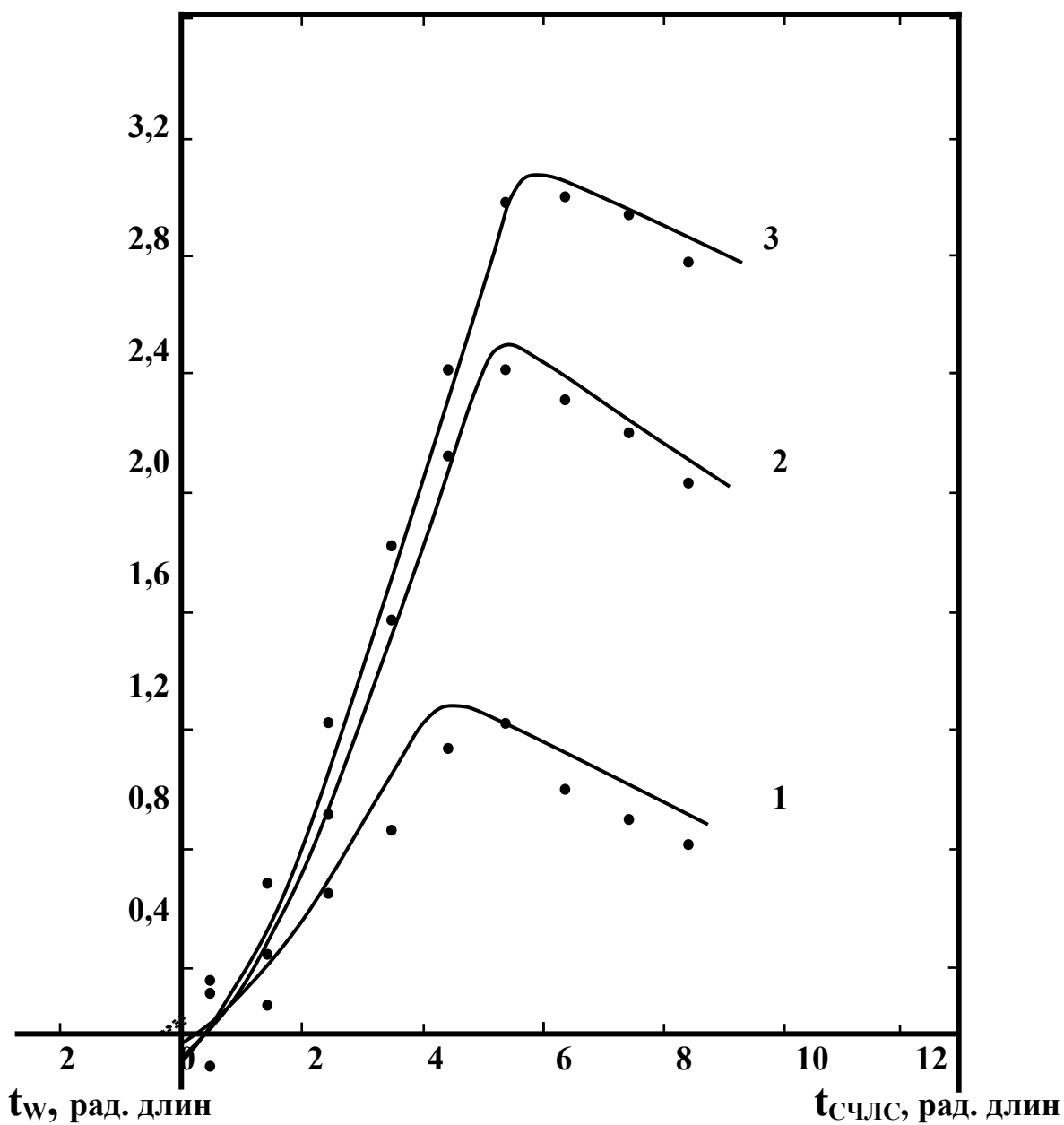


Рис. 6 Каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от γ -квантов (перед СЧЛС разориентированный кристалл вольфрама толщиной 1 мм; $\langle \Delta E \rangle$ - средняя энергия ливня, выделившаяся в счетчике СЧЛС): 1 - $\langle E_\gamma \rangle = 9$ ГэВ; 2 - $\langle E_\gamma \rangle = 20,5$ ГэВ; $\langle E_\gamma \rangle = 26$ ГэВ.

$\langle E \rangle$, ГэВ

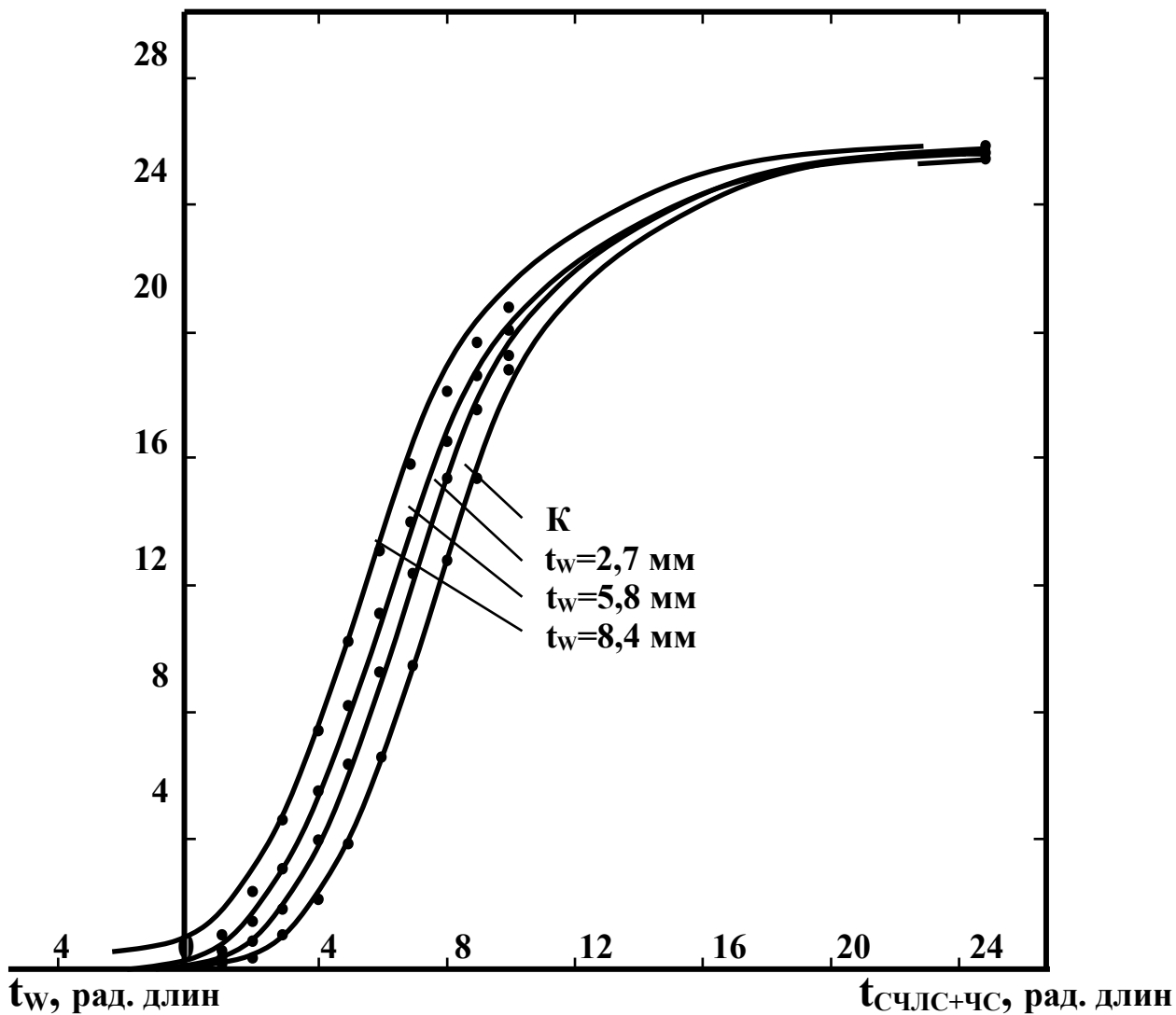


Рис. 7 Интегральные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС и ЧС от электронов с энергией $E_e = 26$ ГэВ при разных толщинах разориентированных кристаллов вольфрама (К – кристалл перед СЧЛС отсутствует; $\langle E \rangle$ - средняя энергия ливня, зарегистрированная на глубине спектрометра).

$\langle \Delta E \rangle$, ГэВ

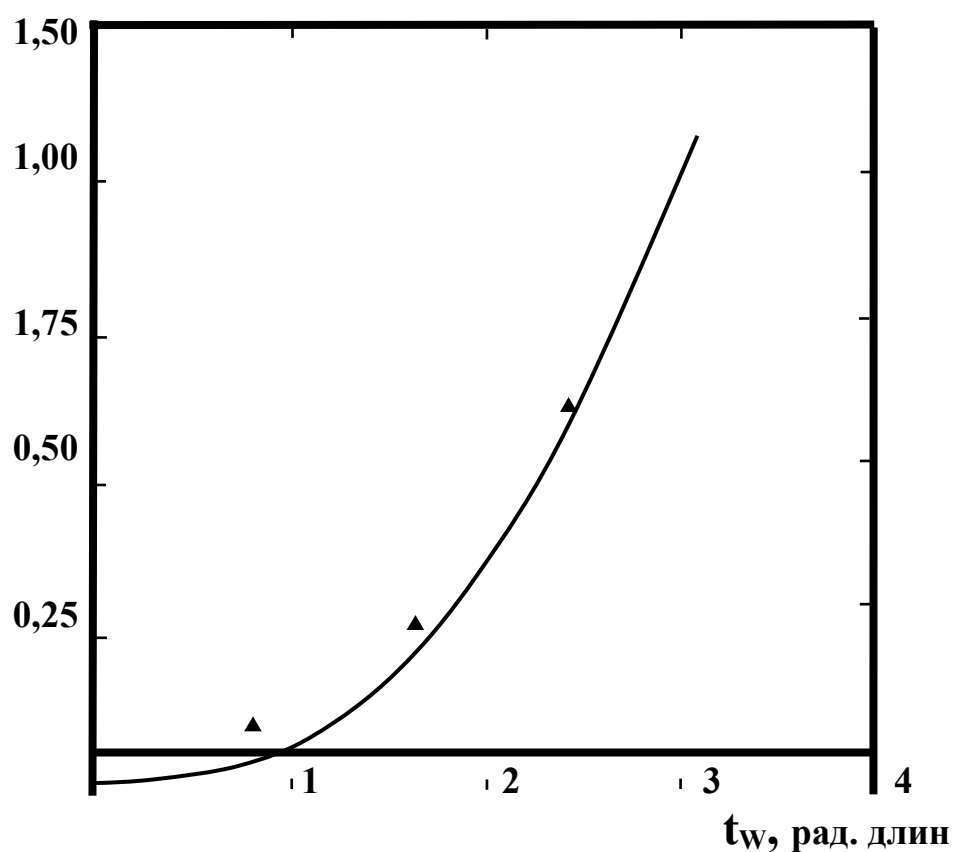


Рис. 8 Зависимость энергии, “недобранной” составным спектрометром СЧЛС и ЧС от толщины разориентированного кристалла вольфрама при энергии электронов $E_e = 26$ ГэВ.

$\delta = \sigma / \langle E \rangle$, %

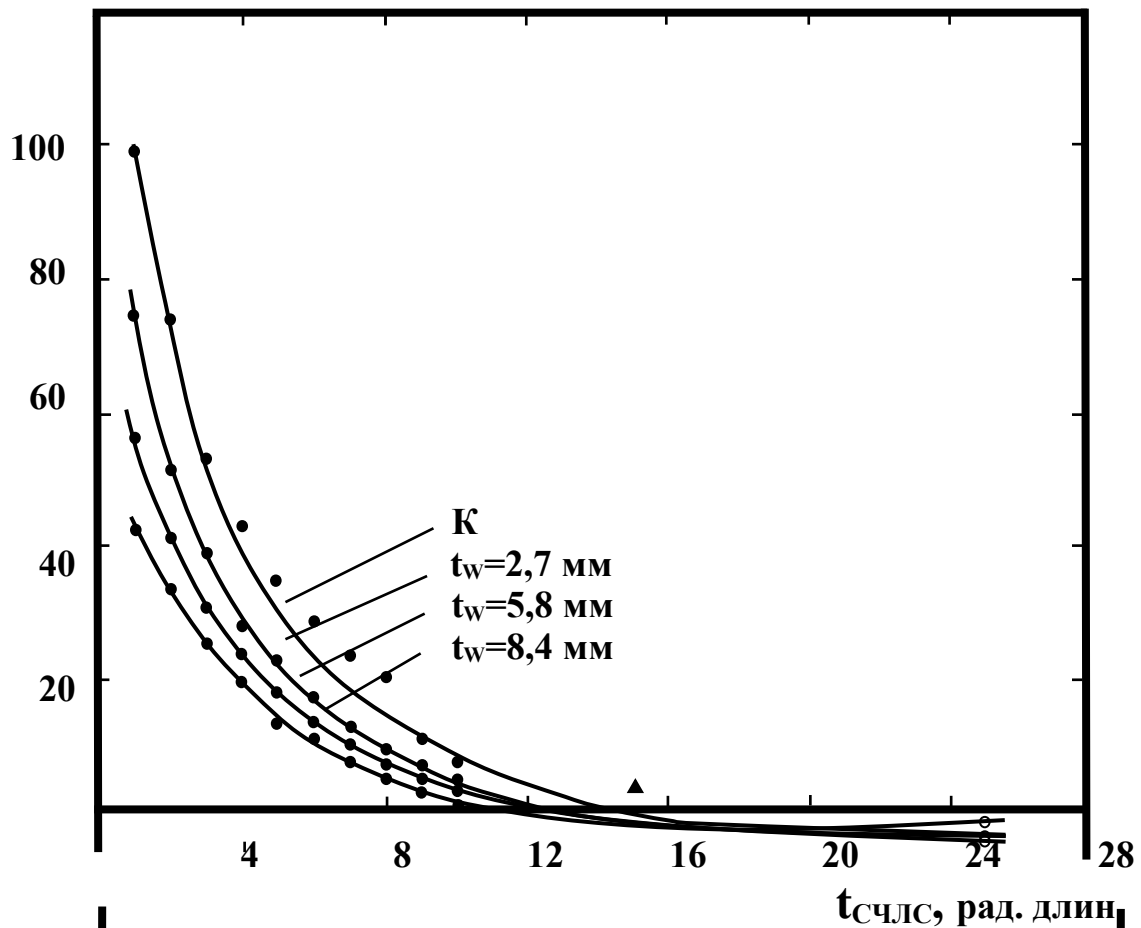
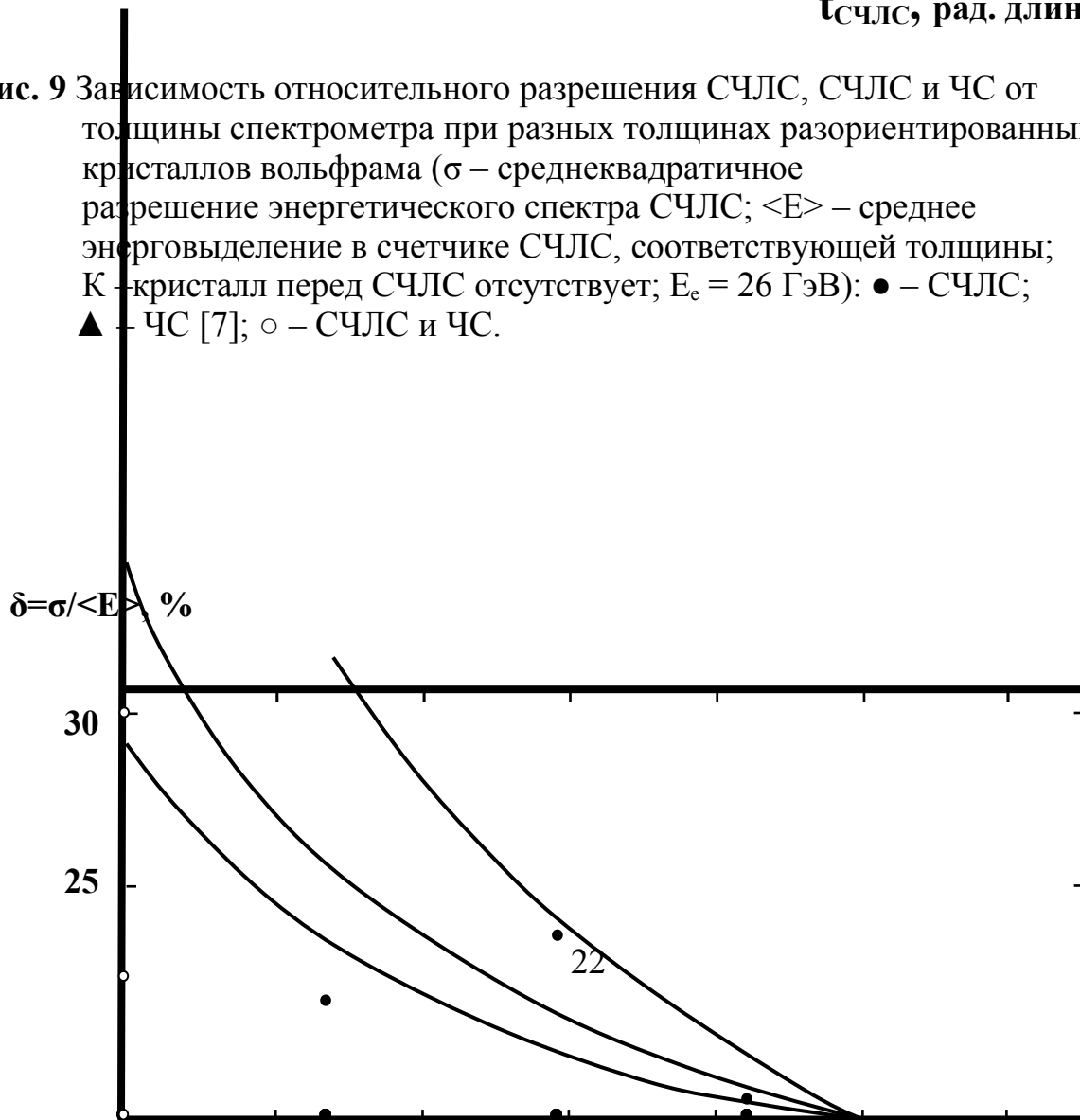


Рис. 9 Зависимость относительного разрешения СЧЛС, СЧЛС и ЧС от толщины спектрометра при разных толщинах разориентированных кристаллов вольфрама (σ – среднее квадратичное разрешение энергетического спектра СЧЛС; $\langle E \rangle$ – среднее энерговыделение в счетчике СЧЛС, соответствующей толщины; К – кристалл перед СЧЛС отсутствует; $E_e = 26$ ГэВ): ● – СЧЛС; ▲ – ЧС [7]; ○ – СЧЛС и ЧС.



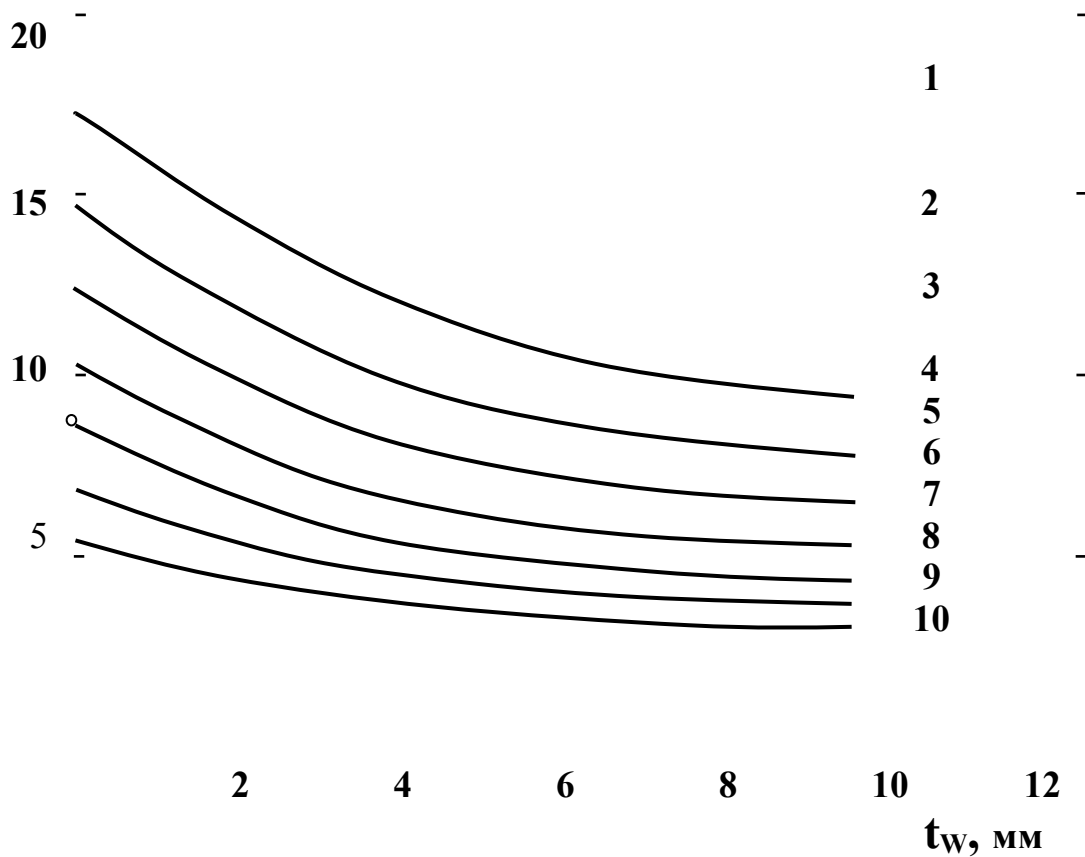
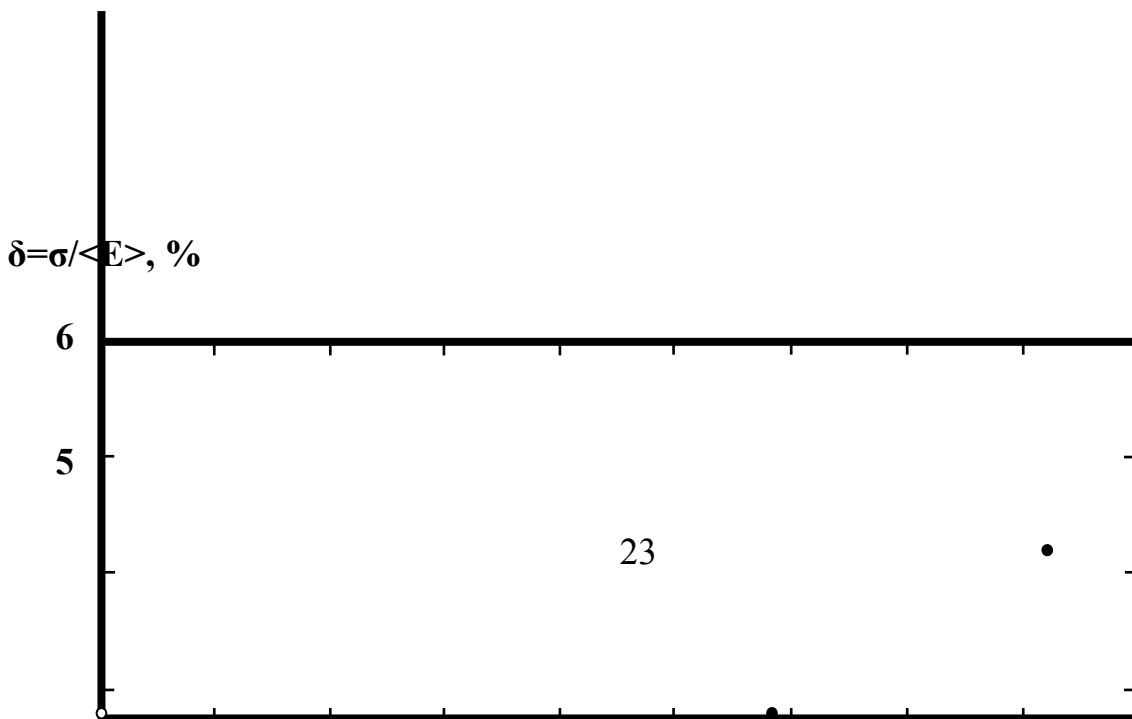


Рис.10 Зависимость относительного энергетического разрешения СЧЛС от толщины разориентированного кристалла вольфрама ($T_w = 293^\circ\text{K}$; толщина СЧЛС в радиационных длинах указана справа; $\langle E \rangle$ – среднее энергосодержание в счетчике СЧЛС, соответствующей толщины; $E_e = 26$ ГэВ; \circ – кристалл перед СЧЛС отсутствует) [9].



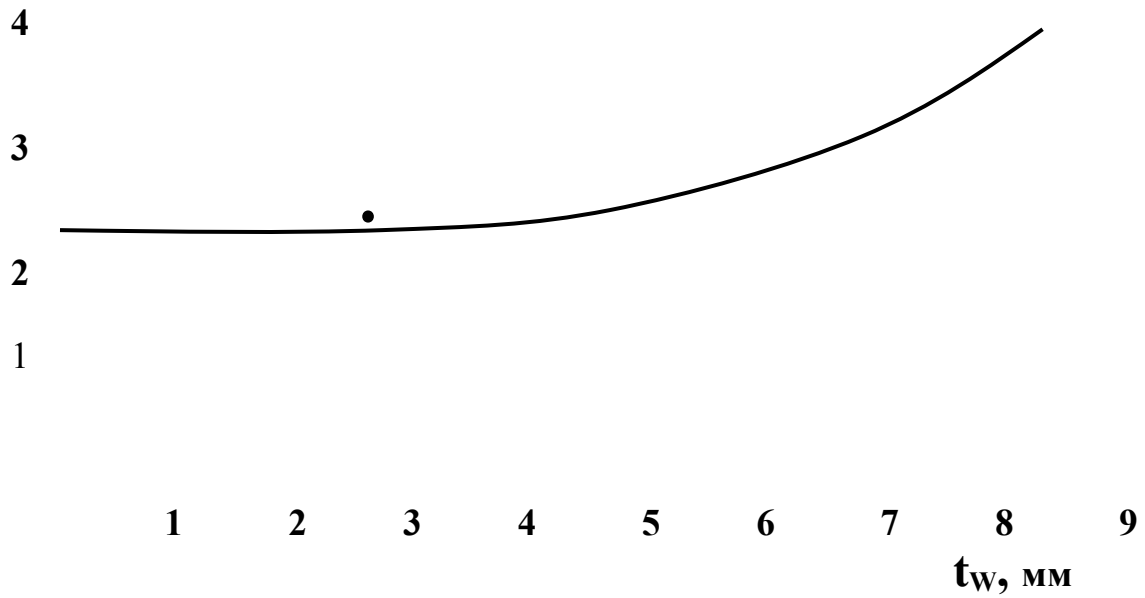


Рис. 11 Зависимость относительного энергетического разрешения СЧЛС и ЧС от толщины разориентированного кристалла вольфрама ($\langle E \rangle$ – среднее энергосодержание в СЧЛС и ЧС общей толщиной $25X_0$; $E_e = 26$ ГэВ; \circ – кристалл перед СЧЛС и ЧС отсутствует).